

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

**APODIZACE BRAGGOVÝCH VLÁKNOVÝCH MŘÍŽEK  
VYRÁBĚNÝCH UV EXPOZICÍ PŘES FÁZOVOU MASKU**

APODIZATION OF THE FIBRE BRAGG GRATINGS BY USE OF PHASE MASK UV EXPOSITION

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tomáš Burian**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. František Urban, CSc.**

**BRNO 2019**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. Tomáš Burian

**ID:** 173626

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### **Apodizace Braggových vláknových mřížek vyráběných UV expozicí přes fázovou masku**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku apodizace vláknových mřížek z pohledu využití v senzorce. Zaměřte se na apodizaci s využitím moaré vícenásobné expozice UV zářením přes fázovou masku. Navrhněte a ověřte postup nastavení a kalibraci expozičního zařízení a postup expozice k dosažení symetrické apodizace mřížek různých délek. Dokumentujte navržené postupy na dosažených vlastnostech apodizovaných mřížek.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Kayshap, R.: Fiber Bragg Gratings. Academic Press 2010, ISBN 978-0-12-372579-0

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 21.5.2019

**Vedoucí práce:** doc. Ing. František Urban, CSc.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce popisuje problematiku vláknových mřížek, zaměřuje se především na využití Braggových mřížek v senzorech. Popisuje druhy výroby vláknových mřížek, především metodu zápisu pomocí fázové masky. Další část pojednává o možnostech využití apodizace v optických vláknových systémech. Zabývá se různými funkcemi, kterými lze apodizaci znázornit. Navazující část popisuje princip moaré, především způsob překrytí dvou fázových masek s rozdílnou periodou.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Braggova mřížka, apodizace, moaré, optické vlákno, senzor, fázová maska, laser

## ABSTRACT

This thesis describes the problem of fiber gratings, focusing primarily on the use of Bragg's grids in the sensor. It describes the types of fiber mesh production, especially the method of writing with a phase mask. The next part deals with the possibilities of using apodization in fiber optic systems. It deals with the various functions that can be used to describe apodization. The following part describes the moire principle, especially the method of overlapping two phase masks with a different period.

## KEYWORDS

Bragg grid, apodization, moire, optical fiber, sensor, phase mask, laser.

BURIAN, Tomáš. *Apodizace Braggových vláknových mřížek vyráběných UV expozicí přes fázovou masku*. Brno, Rok, 66 s. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce: doc. Ing. František Urban, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma „Apodizace Braggových vláknových mřížek vyráběných UV expozicí přes fázovou masku“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Františku Urbanovi, CSc. za ochotu. Dále kolegům ze společnosti Network group s.r.o. za cenné rady a čas, který mi věnovali při řešení dané problematiky.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Historický vývoj</b>	<b>12</b>
<b>2 Vláknové mřížky</b>	<b>13</b>
2.1 Braggova vláknová mřížka . . . . .	13
2.2 Mřížka s dlouhou periodou . . . . .	13
<b>3 Fotocitlivost v optických vláknech</b>	<b>15</b>
3.1 Techniky pro zvyšování fotocitlivosti . . . . .	15
3.1.1 Zvyšování obsahu germania v jádru vlákna . . . . .	16
3.1.2 Hydrogenizace . . . . .	16
3.1.3 Žárové žíhání . . . . .	16
3.1.4 Současné dopování dalším prvkem . . . . .	17
3.2 Techniky pro výrobu vláknových mřížek . . . . .	17
3.2.1 Interferometrická metoda . . . . .	18
3.2.2 Metoda využívající fázové masky . . . . .	19
3.2.3 Výroba fázové masky . . . . .	20
3.3 Další metody výroby mřížek . . . . .	22
3.3.1 Metoda bod po bodu . . . . .	22
3.3.2 Interferometr s fázovou maskou . . . . .	23
3.3.3 Lloydův zrcadlový interferometr . . . . .	23
<b>4 Struktura optického vlákna</b>	<b>25</b>
4.1 Materiál pro výrobu optických vláken . . . . .	25
4.2 Primární izolace . . . . .	28
4.2.1 Stripování vlákna . . . . .	28
4.2.2 Stripovací automat 3SAE-ASII . . . . .	29
<b>5 Apodizace</b>	<b>30</b>
5.1 Druhy apodizačních funkcí . . . . .	30
5.1.1 Apodizační funkce Connes . . . . .	30
5.1.2 Apodizační funkce Cosine . . . . .	31
5.1.3 Apodizační funkce Hamming . . . . .	32
5.2 Základní metody vytvoření apodizované mřížky . . . . .	32
5.2.1 Vytvoření apodizované mřížky symetrickým protažením . . . . .	33
<b>6 Metoda moaré</b>	<b>36</b>

<b>7</b>	<b>Optická vlákna jako senzor</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>Piezoelektrický jev</b>	<b>39</b>
8.1	Princip piezoelektrického jevu . . . . .	39
8.2	Piezoelektrické mikroaktuátory . . . . .	40
8.2.1	Mnohovrstvý mikroaktuátor . . . . .	40
8.3	Piezoelektrický aktuátor PK2FSF1 . . . . .	41
<b>9</b>	<b>Simulace apodizované Braggovy mřížky</b>	<b>43</b>
9.1	Simulace pro statický režim . . . . .	50
<b>10</b>	<b>Praktické vytvoření Braggovy mřížky</b>	<b>51</b>
10.1	Natažení vlákna . . . . .	51
10.2	Statický režim . . . . .	55
10.3	Dynamický režim . . . . .	58
<b>11</b>	<b>Závěr</b>	<b>61</b>
	<b>Literatura</b>	<b>62</b>
<b>A</b>	<b>Přílohy</b>	<b>65</b>
A.1	Simulované hodnoty pro mřížku 3,5 mm . . . . .	65
A.2	Simulované hodnoty pro mřížku 5 mm . . . . .	65
A.3	Simulované hodnoty pro mřížku 10 mm . . . . .	65
A.4	Simulované hodnoty pro mřížku 15 mm . . . . .	65
A.5	Simulace pro statický režim . . . . .	65
A.6	Simulace jiného profilu změny indexu lomu . . . . .	65
<b>B</b>	<b>Příloha</b>	<b>66</b>
B.1	Eperimentální měření . . . . .	66



# Seznam obrázků

2.1	Schéma Braggovy vláknové mřížky . . . . .	13
2.2	Odraz na Braggově mřížce . . . . .	14
2.3	Struktura Braggovy mřížky a mřížky s dlouhou periodou . . . . .	14
3.1	Osvit vlákna interferometrickou metodou . . . . .	18
3.2	Výroba mřížky fázovou maskou . . . . .	20
3.3	Schéma výroby fázové masky elektrolitografií . . . . .	21
3.4	Výroba vláknové mřížky metodou bod po bodu . . . . .	22
3.5	Lloydův interferometr . . . . .	24
4.1	Typické standardní vlákno . . . . .	25
4.2	Útlum optického vlákna v závislosti na vlnové délce . . . . .	26
4.3	Stripovací automat 3SAE-ASII . . . . .	29
5.1	Apodizační profil funkce Connes . . . . .	31
5.2	Apodizační profil funkce Cosine . . . . .	31
5.3	Apodizační profil funkce Hamming . . . . .	32
5.4	Schéma symetricky nataženého vlákna pro apodizovanou mřížku . . .	34
5.5	Mechanický model pro symetrické natažení vlákna . . . . .	35
6.1	Základní typy mřížek a vznik moaré pruhů . . . . .	36
8.1	Krystalická mřížka . . . . .	39
8.2	Krystalická mřížka . . . . .	41
8.3	Příklad zvětšení rozsahu pohybu vícevrstevných piezoelektrických akč- ních členů . . . . .	41
8.4	Příklad polymorfní struktury . . . . .	42
9.1	Neapodizovaná mřížka: závislost indexu lomu na délce mřížky, odra- zivost 50% . . . . .	44
9.2	Neapodizovaná mřížka: odražené spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	44
9.3	Neapodizovaná mřížka: průchozí spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	44
9.4	Neapodizovaná mřížka: závislost indexu lomu na délce mřížky, odra- zivost 80% . . . . .	45
9.5	Neapodizovaná mřížka: odražené spektrum, odrazivost 80 % . . . . .	45
9.6	Neapodizovaná mřížka: průchozí spektrum, odrazivost 80 % . . . . .	46
9.7	Apodizovaná mřížka: závislost indexu lomu na délce mřížky, odrazi- vost 50% . . . . .	46
9.8	Apodizovaná mřížka: odražené spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	47
9.9	Apodizovaná mřížka: průchozí spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	47
9.10	Apodizovaná mřížka: Závislost indexu lomu na délce mřížky, odrazi- vost 80% . . . . .	48
9.11	Apodizovaná mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 80 % . . . . .	48

9.12 Apodizovaná mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 80 % . . . . .	48
10.1 Neapodizovaná mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	53
10.2 Neapodizovaná mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	53
10.3 Neapodizovaná mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 80 % . . . . .	54
10.4 Neapodizovaná mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 80 % . . . . .	54
10.5 Apodizovaná mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	55
10.6 Apodizovaná mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	55
10.7 Apodizovaná mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 80 % . . . . .	56
10.8 Apodizovaná mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	56
10.9 Apodizovaná mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	58
10.10 Apodizovaná mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 50 % . . . . .	58
10.11 Apodizovaná mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 80 % . . . . .	59
10.12 Apodizovaná mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 80 % . . . . .	59

# Seznam tabulek

8.1	Základní parametry piezoelektrického aktuatoru . . . . .	42
9.1	Simulované hodnoty pro neapodizovanou mřížku, odrazivost 50 % . .	45
9.2	Simulované hodnoty pro neapodizovanou mřížku, odrazivost 80 % . .	46
9.3	Simulované hodnoty pro Apodizovanou mřížku, odrazivost 50 % . . .	47
9.4	Simulované hodnoty pro apodizovanou mřížku, odrazivost 80 % . . .	49
9.5	Simulované hodnoty v tabulkách určené pro statickou metodu apodi- zace 50 % . . . . .	50
9.6	Simulované hodnoty v tabulkách určené pro statickou metodu apodi- zace 80 % . . . . .	50
10.1	Naměřené hodnoty pro Apodizovanou mřížku, odrazivost 50 % . . . .	53
10.2	Naměřené hodnoty pro Apodizovanou mřížku, odrazivost 80 % . . . .	54
10.3	Naměřené hodnoty pro Apodizovanou mřížku, odrazivost 50 % . . . .	56
10.4	Naměřené hodnoty pro apodizovanou mřížku, odrazivost 80 % . . . .	57
10.5	Naměřené hodnoty pro Apodizovanou mřížku, odrazivost 50 % . . . .	59
10.6	Naměřené hodnoty pro Apodizovanou mřížku, odrazivost 80 % . . . .	60

# Úvod

Optoelektronika a s ní spojená optická vlákna jsou v dnešní době již nedílnou součástí datových systémů. S rozvíjejícími znalostmi a pokrokem v optoelektronice se optická vlákna začala používat také v senzorice, proto musely být navrženy, postupy jakým způsobem lze vytvořit přesné detekční snímače obsahující optický prvek. Zároveň byly využity kladné materiálové vlastnosti těchto optických prvků. Rozšiřování možností použití optických vláken způsobilo, že dnes se běžně používají v telekomunikační technice, nebo také v biomedicině a lékařství. Speciální struktury vláknových mřížek se uplatňují ve vláknových laserech a zesilovačích. Pro rozšíření detekčních schopností je možné využít možnosti apodizace vláknových mřížek. Jednou z možností, jak se dají vláknové mřížky apodizovat, je použití fázové masky s rozdílnou periodou. Tuto skutečnost popisuje jev, který se nazývá moaré. Tento efekt vzniká na strukturách, které mají podobné rozměry.

# 1 Historický vývoj

Aplikování optických vláken do telekomunikačních technologií a v pozdější době také do oblasti sensoriky byl pro tuto odvětví významným krokem v před. Eminentním obdobím byla šedesátá leta minulého století, kdy se uskutečnily první úspěšné pokusy o výrobu optického vlákna. Útlum se tehdy pohyboval na podobné úrovni jako u toho času, hojně využívaných koaxiálních kabelů. Progres následujících dvaceti let způsobil zlepšení technologie výroby, proto se optická vlákna začala významněji prosazovat na trhu a stala se tak konkurentem metalických vodičů. V dnešní době se optoelektrická zařízení stala nepostradatelnou součástí především v již zmiňované sensorice a telekomunikační technice. S rozvojem technologie je možné dosáhnout na rychlost přenosu v optických vláknech až 100 Gb/s, provozovat nezávislý datový tok až 80 kanálů. Významný rozvoj zaznamenala také polovodičová technika, proto mohli být nahrazeny klasické led diody novějšími zařízeními v podobě polovodičových injekčních laserů, i to mělo za následek stále se rozvíjejících možností použití optických kabelů do nejrůznějších aplikací. S vývojem vláknových struktur se zakalilo v telekomunikacích využívat především jednovidových vláken, které jsou charakteristické svým nízkým měrným útlumem pohybujícím se okolo 0,3 dB/km v závislosti na vlnové délce. Neustále se zvyšující nároky na výkon způsobuje omezení útlumu vláken, tuto komplikaci lze kompenzovat optickými zesilovači a také v chromatické a polarizační vidové disperzi, které způsobují zhoršení kvality přenášeného signálu. Existuje několik způsobů jak lze potlačit vliv chromatické disperze na přenos, může být použito koherentního optického zdroje, jako je třeba laserová dioda s úzkou šířkou spektrální čáry.[3]

Značnou citlivostí vlákna na mechanické a tepelné působení je dosaženo použitím vysoce koherentního zdroje světla s dobře definovanou polarizací. Pro zachování vlastností koherentnosti světla ve vláknech u nových snímačů se zejména používají jednovidová vlákna. Obvykle se senzory konstruují s využitím prvků upravujících spektrum světla podle působení měřené veličiny. K modifikacím optického spektra a k jeho vyhodnocování se většinou používají frekvenčně závislé optické vláknové prvky, jako už zmiňované vláknové Braggovy mřížky. Jak již bylo řečeno Braggovy mřížky jsou významnou součástí telekomunikací i snímacích vláknových systémů.

## 2 Vláknové mřížky

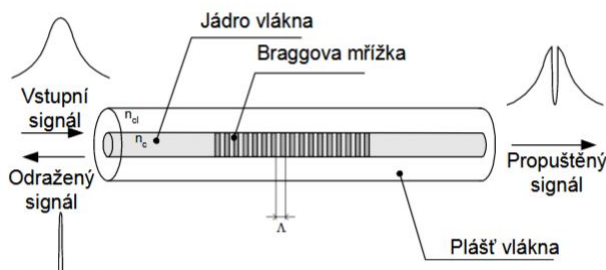
### 2.1 Braggova vláknová mřížka

Braggova mřížka je struktura, která je tvořena periodickými nebo kvaziperiodickými rozdíly indexu lomu v jádře optického vlákna v podélném směru jeho osy. Bylo vytvořeno několik různých postupů výroby Braggových mřížek. Společným prvkem pro většinu metod při výrobě Braggových mřížek je UV laser, jehož koherentní záření zapíše požadovanou strukturu mřížky do jádra vlákna. Obecně je možné konstatovat, že aby bylo docíleno interakce světelné vlny s jakoukoli difrakční mřížkou, mřížka musí tvořit více jak tisíc periodických změn indexu lomu, důležité také je, aby rozdíl mezi minimem a maximem indexu lom ve struktuře byl co možná největší. [6]

Abychom mohli vytvořenou mřížku označovat jako Braggovu mřížku, musí splňovat tzv. Braggovu podmínku difrakce. Braggovu podmínku difrakce[2]:

$$\lambda_{Bragg} = \frac{2 \times n_{eff} \times \Lambda}{N} \quad (2.1)$$

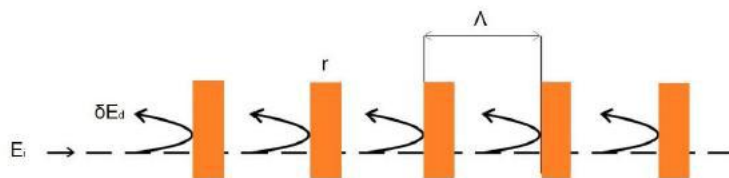
Braggova podmínka vyžaduje, aby perioda změn indexu lomu mřížky byla rovna polovině vlnové délky světla procházejícím vláknem. Poté nastane interakce mřížky ve vlákně s procházejícím světlem, to se následně s velkou účinností odráží zpět ke zdroji světla. K difrakci také může dojít, jestliže je perioda mřížky rovna celistvému násobku poloviny vlnové délky světla. Pak se jedná o mřížky s dlouhou periodou.[6]



Obr. 2.1: Schéma Braggovy vláknové mřížky.[6]

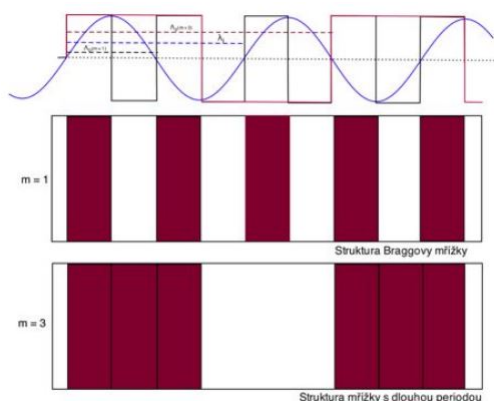
### 2.2 Mřížka s dlouhou periodou

Na obrázku 2.3 jsou zobrazeny pro porovnání dvě mřížky a průběhy jejich změn indexu lomu. Podle jejich zobrazení můžeme rozpoznat základní rozdíl mezi strukturou Braggovy mřížky a mřížky s dlouhou periodou. První struktura pojmenovaná



Obr. 2.2: Odraz na Braggově mřížce.[6]

$m = 1$  je Braggova mřížka, která koresponduje s průběhem příslušné změny indexu lomu s periodou  $\Lambda_0$  ( $m=1$ ). Na obrázku je patrné, že mřížka zde splňuje Braggovu podmínku a tudíž, se prostorová perioda indexových změn mřížky je rovna polovině délky vlny světla ve vláknu. Abychom mohli mřížku označit za mřížku s dlouhou periodou, musí tato mřížka obsahovat v jedné periodě indexu lomu celistvý násobek poloviny délky vlny ve vláknu. Mřížce s dlouhou periodou odpovídá například struktura s indexem  $m = 3$  a  $\Lambda_0$  ( $m = 3$ ).[6]



Obr. 2.3: Struktura Braggovy mřížky a mřížky s dlouhou periodou. [6]

Další rozdílným faktorem mezi mřížkami s dlouhou periodou a Braggovou mřížkou je v postupu výroby. Mřížky s dlouhou periodou se dají realizovat postupným zápisem změn indexu lomu jednotlivých čar do vlákna a není tudíž nutné využití fázové masky a poté i potřebné interference pro výrobu, čehož se využívá u Braggovy mřížky. Díky využití technologie výroby postupného zápisu je možné jednoduše realizovat mřížky s proměnou periodou, ale pro dosažení stejných vlastností jako u Braggových mřížek je nutná několikanásobně větší geometrická délka mřížky než je tomu u Braggovy mřížky. [6]

## 3 Fotocitlivost v optických vláknech

Vláknová fotocitlivost umožňuje trvalé změny indexu lomu v jádru vlákna na základě osvitu vlákna zářením o příhodné vlnové délce a intenzitě. Na počátku se fotocitlivost ve vláknech spojovala především s germaniem dopovanými vlákny z křemičitého skla. S následujícími roky vývoje však byla nalezena fotocitlivost v mnoha dalších vláknech, z nichž některé neobsahovaly germanium vůbec. Přesto se dodnes využívá vláken, která mají jádra dopována germaniem, je to jedna z nejpoužívanějších metod. Při zjišťování nezbytnosti dopantů při fotocitlivosti vlákna bylo vydáno mnoho studií. Prvním důkazem byl fakt, že germanium se vyskytuje jako dopant u všech fotocitlivých vláken. Bylo také ověřeno, že nedochází k tvorbě mřížky při osvitu vláken z čistě křemičitého skla. To vedlo k závěru, že germanium je nezbytný dopant k dosažení fotocitlivosti. Toto tvrzení však bylo později vyvráceno, když bylo dosaženo fotocitlivosti u vláken dopovaných europiem, ceriem, a erbium:germaniem. Avšak ani jeden z uvedených dopantů nedosahuje tak významné citlivosti jako germanium. Poměrně velké fotocitlivost je možné dosáhnout dopací germanium-bórem. Prakticky však zůstávají vlákna s germaniem dopovaným jádrem nejschůdnější variantou pro výrobu vláknových mřížek v telekomunikačním průmyslu i v senzorních aplikacích. Za základ fotocitlivosti v germaniem dopovaném křemičitém sklu se považují poruchy v germanio-kyslíkové struktuře (GODCs – Germanium Oxygen Deficient Centers), jako je dvojmocný neutrální atom germania (O-Ge-O nebo Ge<sub>2</sub>O centrum), Ge-Si nebo Ge-Ge (nazývané také „chybné spoje“). Obecně je však fotocitlivost funkcí mnoha mechanismů (fotochemických, fotomechanických, termomechanických) a je závislá na vlastnostech konkrétního vlákna, stejně jako na intenzitě a vlnové délce dopadajícího záření.[1][2]

### 3.1 Techniky pro zvyšování fotocitlivosti

Kompatibilita se standartními druhy vláknem je zásadní, proto se často volí poměrně univerzální telekomunikační vlákno. V praxi se využívají pro různé prvky zapotřebí různé typy vláken. Tento důvod je výzvou pro objevování nových technik výroby mřížek a zvyšování fotocitlivosti vláken.[1][2]

Od objevení fotocitlivosti ve vláknech a výroby prvních mřížek v germanio-křemičitých vláknech je neustálá snaha k pochopení a zlepšování fotocitlivosti. Zlepšování fotocitlivosti je hlavní prioritou od jejího objevení. Běžná telekomunikační vlákna s obsahem germania okolo 3 % mají typicky možnost změny indexu lomu  $\delta_n$  přibližně  $3 \times 10^{-5}$ . Zpravidla zvyšování úrovně dopace vede ke zvýšení  $\delta_n$  až na hodnoty okolo  $5 \times 10^{-4}$ . Pro většinu běžných aplikací je tato hodnota postačující,



ale v některých aplikacích, kde jsou zapotřebí vysokoodrazné mřížky je nezbytné navýšení změny indexu lomu  $\delta_n$  až v řádu  $10^{-3}$ . Existuje několik metod pro zvyšování fotocitlivosti, jako jsou např. hydrogenizace, žárové žíhání nebo současná dopace dalším prvkem.[2]

### 3.1.1 Zvyšování obsahu germania v jádru vlákna

Fotocitlivost bezprostředně souvisí s množstvím defektních center (GODCs) v jádru vlákna. Existence těchto center je spojený s absorpcí světla na vlnové délce okolo 240 nm a je typickým výskytem Ge-Ge vazeb, které jsou chybně spojeny. Pravděpodobnost vzniku defektů většinou roste s koncentrací germania, zvýšený počet těchto defektů vede ke zvýšení fotocitlivosti. Saturovaná změna indexu lomu vyvolaná UV zářením roste přibližně lineárně se zvyšující se koncentrací germania. Velikost změny  $\delta_n$  se pohybuje od  $3 \times 10^{-5}$  pro standardní telekomunikační vlákna (3 mol%  $GeO_2$ ) až po  $2,5 \times 10^{-4}$  pro vysoce dopovaná vlákna ( $\sim 20$  mol%  $GeO_2$ ) při osvitu kontinuálním laserem na vlnové délce 244 nm.[1][2]

### 3.1.2 Hydrogenizace

Tato metoda je založena na difuzi molekul vodíku do struktury vlákna. Základem procesu je vlákno uložit na několik dní až týdnů do tlakové komory, která je napuštěna plynným vodíkem. Samotná hydrogenizace probíhá při teplotách 20 - 75°C a tlaku typicky okolo 150 bar. Tento postup způsobí difuzi molekul vodíku do jádra vlákna. V 95 % případů dochází k difuzi vodíku až do jádra vlákna i při pokojové teplotě. Touto metodou lze dosáhnout permanentní změny indexu lomu až na  $10^{-2}$ . Výhodou hydrogenizace je možnost výroby vláknových mřížek v jakýchkoliv germanio-křemičitých i bezgermaniových vláknech. Poté vodík difunduje ven z vlákna a to v oblastech, které nebyly osvětleny. Díky tomu nejsou negativně ovlivněny přenosové vlastnosti vláken v důsledku přítomnosti OH skupin, které vedou k útlumu v důležitých komunikačních oknech.[1][2]

### 3.1.3 Žárové žíhání

Jde o jednoduchou a efektivní metodu pro zvýšení fotocitlivosti v germanio-křemičitých vláknech. Zvýšení fotocitlivosti pomocí žárového žíhání způsobuje pouze zanedbatelné zvýšení útlumu na důležitých komunikačních oknech vlákna. Oblast vlákna, ve které je třeba zvýšit fotocitlivost, se opakovaně vystavuje plamenu z vodíkového hořáku, který může dosahovat teploty až 1700°C. Při takhle vysokých teplotách dochází k difuzi vodíku do jádra vlákna velice rychle a dochází k reakcím vedoucím k tvorbě GODCs. Zvyšování fotocitlivosti touto cestou trvá přibližně 20 minut. Tvorba

GODCs vyvolává ve vlákne silné absorpční pásmo na vlnové délce 240 nm, což vede k vysokému nárůstu fotocitlivosti jádra vlákna. Technika žárového žíhání byla použita ke zvýšení fotocitlivosti standardního telekomunikačního vlákna na více než 10-ti násobek, způsobující změnu indexu lomu  $\delta_n$  až  $10^{-3}$ . Techniky pro zvýšení fotocitlivosti založené na hydrogenizaci a žárovém žíhání sledují stejný koncept. V obou případech je využito vodíku k chemické reakci v germanio-křemičitém sklu, aby došlo k vytvoření GODCs a tím zvýšení fotocitlivosti. Je zde, ale několik výhod žárového žíhání oproti hydrogenizaci. Při žárovém žíhání je fotocitlivost permanentní, na rozdíl od hydrogenizace nedochází ke snižování fotocitlivosti v důsledku difuze vodíku ven z vlákna. Žárově žíhaná vlákna umožňují vytváření silných mřížek (mřížky s velkým  $\delta_n$ ) ve standardních telekomunikačních vláknech, které samy o sobě nevykazují téměř žádnou fotocitlivost. Díky relativně malé velikosti plamene lze zvýšit fotocitlivost vlákna lokálně. Hlavní nevýhodou žárově žíhaných vláken však zůstává fakt, že při tomto procesu dochází v důsledku vysokých teplot k oslabení vlákna, což může způsobovat problémy z hlediska dlouhodobé stability takto vyrobených mřížek.[2]

### 3.1.4 Současné dopování dalším prvkem

Výroba germanio-křemičitých vláken vede také ke zvyšování fotocitlivosti. V praxi se pak nejčastěji používá kodopace bórem, která vede ke zvýšení fotocitlivosti až na 4 násobek. K výrobě těchto vláken se nejčastěji používá modifikovaná depozice z plynné fáze (MCVD – Modified Chemical Vapour Deposition). Dopování bórem neovlivňuje absorpci na vlnové délce 240 nm (ani tvar absorpčního maxima na této vlnové délce) a nebyla zjištěna ani jiná absorpční maxima. Z toho vyplývá, že dopace bórem nezvyšuje fotocitlivost prostřednictvím vzniku dalších GODC, jako je tomu v případě hydrogenizace a žárového žíhání. Dopace bórem však způsobuje změnu termomechanických vlastností na rozhraní germanium-bór-křemíkového jádra a křemíkového pláště vlákna. Některé teorie poukazují na to, že ke zvýšení fotocitlivosti ve vlákne dochází fotoindukovaným uvolněním pnutí na rozhraní jádro-plášť.[1][2]

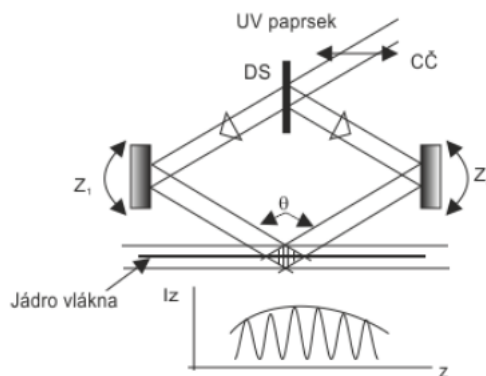
## 3.2 Techniky pro výrobu vláknových mřížek

Pro výrobu mřížek jsou v dnešní době používány metody zápisu boční expozicí UV zářením. Při bočním osvitu se nejčastěji uplatňují techniky, kde se UV svazek rozdělí na dva, které potom interferují v místě, kde je vlákno. Tento interferenční vzor pak tvoří strukturu vznikající mřížky. Rozdělení svazku a následné interference se nejčastěji dosahuje pomocí splitteru nebo fázové masky. Další možný způsob výroby mřížek je neinterferometrický, kdy boční osvit vlákna probíhá bodově a je následován

posunem vlákna o vzdálenost odpovídající periodě mřížky. Tato metoda je výstižně pojmenována bod za bodem (point-by-point). Metody založené na boční expozici překonávají základní omezení mřížek vyráběných vnitřním zápisem, zpočátku však nebyly dosažitelné kvůli vysokým technologickým nárokům. Vnější metody vyžadují submikronovou přesnost, tedy i velkou stabilitu celého výrobního procesu. V současnosti jsou, ale tyto procesy dobře kontrolovatelné, a tak se stává dosažitelná i sériová výroba vláknových mřížek.[2]

### 3.2.1 Interferometrická metoda

Tuto metodu pro boční zápis vláknové mřížky poprvé demonstroval Metz a kolektiv. Metoda je založená na interferometru, který se standardně používá v holografii. Svazek z UV laseru je rozdělen na dva pomocí splitteru a následně opět spojen pod společným úhlem  $\alpha$  pomocí soustavy dvou zrcadel, jak je naznačeno na obrázku 3.1[2]



Obr. 3.1: Osvit vlákna interferometrickou metodou.[2]

Tato metoda umožňuje, aby byla Braggova rezonanční vlnová délka nezávislá na vlnové délce dopadajícího UV záření. Vztah popisující závislost mezi vlnovou délkou dopadajícího záření, úhlem interferujících svazků a Braggovou rezonanční vlnovou délkou je dán mřížku s Braggovou rezonanční vlnovou délkou v rozmezí od přibližně  $\lambda_{uv}$  do nekonečna (při  $\alpha = 0$ )[2]

$$\lambda_{Bragg} = \frac{n_{eff} \times \lambda_{uv}}{n_{uv} \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (3.1)$$

Při osvitu je vlákno umístěno v místě, kde se svazky protínají. Tímto způsobem byly úspěšně vytvořeny mřížky i pro oblast viditelného světla. Interferometrická metoda je ideální pro zapisování krátkých mřížek jedním pulzem, při sestavování

optické trasy podle je zapotřebí klást důraz na přesnost a precizní provedení jednotlivých dílů. Mechanické vibrace, délka trasy svazků ve vzduchu a kvalita jednotlivých částí trasy ovlivňují kvalitu a časovou stabilitu interferogramu. Protože svazky mají poměrně dlouhou dráhu a jsou ve volném prostředí, je zapotřebí celou trasu chránit před vzdušnými turbulencemi a teplotními výkyvy. Tyto faktory ovlivňují časovou nestabilitu indexu lomu prostředí a tím délku optické trasy. I při malých změnách délky optické trasy, ať už vlivem turbulencí nebo mechanických vibrací, dochází v čase k posunu interferenčních pruhů a tím ke snižování kontrastu zapisované mřížky. Proto tato metoda není vhodná pro dlouhé zapisovací časy. Při sestavování aparátu pro výrobu mřížek touto metodou je zapotřebí dodržet určité zásady. Celá sestava musí být na stabilním optickém stole, aby docházelo k co nejmenšímu přenosu mechanických vibrací. Použité splittery, zrcátka a další případné prvky v optické trase by neměly být umístěny na vysokých podstavcích, ale na stabilních držácích co nejblíže desce, aby případné vibrace způsobovaly co nejmenší výkyvy. Toto je zapotřebí obzvláště, když je nezbytná delší zapisovací doba (několik minut). Někdy se také celý interferometr umísťuje do boxu z plexiskla, aby se zabránilo vzdušným turbulencím v průběhu zapisování.[2]

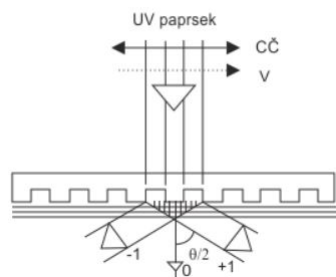
Při sestavování interferometru je možné zaměnit splitter za odraznou difrakční mřížku. Odrazem od difrakční mřížky je možné dosáhnout rozdělení svazku na dva rovnoměrně rozložené koherentní svazky. Jednodušší je ale použití propustné fázové mřížky, která je v aplikacích spojených s výrobou vláknových mřížek známá pod názvem fázová maska.

### 3.2.2 Metoda využívající fázové masky

Významné zjednodušení zápisu vláknových mřížek bylo dosaženo použitím fázové masky jako části interferometru. V propustném režimu je fázová maska tvořena mřížkovým reliéfem vyleptaným na desce z křemenného skla. Toto křemenné sklo musí být propustné pro UV oblast záření, reliéf masky má přesně daný poměr pruhmezera a hloubku leptání. Princip fungování je založen na difrakci dopadajícího UV světla do několika difrakčních řádů,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , jak je schematicky znázorněno na obrázku 3.2 Dopadající optické záření a difrakční řády splňují základní difrakční rovnici, s periodou masky  $\Lambda_{pm}$ :

$$\Lambda_{pm} = \frac{m \times \lambda_{uv}}{\sin \frac{\theta_m}{2} \times \sin \theta_i} \quad (3.2)$$

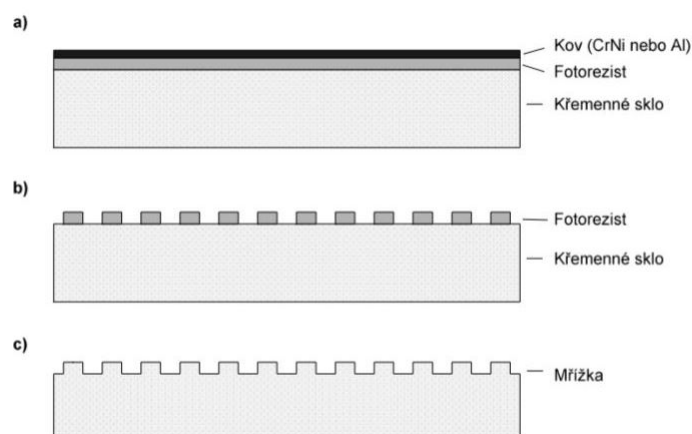
kde  $\theta_m/2$  je úhel difrakčního řádu,  $\lambda_{uv}$  je vlnová délka UV svazku dopadajícího pod úhlem  $\theta_i$ . V případě, že perioda mřížky leží mezi  $\lambda_{uv}$  a  $\lambda_{uv}/2$ , dochází k vytvoření pouze prvního difrakčního řádu  $m = -1$ , zbytek výkonu zůstává v procházející vlně  $m = 0$ . [2][6]



Obr. 3.2: Výroba mřížky fázovou maskou.[2]

### 3.2.3 Výroba fázové masky

Pro výrobu fázových masek se běžně používají dvě metody – elektronová litografie nebo holografická expozice. Při výrobě masky pomocí elektronové litografie se na desku z křemenného skla nanese fotorezist, do kterého se potom pomocí elektronového svazku zapíše vzor (čáry s odpovídajícím rozestupem). Jako fotorezist se nejčastěji používá dvouvrstvý negativní rezist tloušťky okolo 500 nm. Kvůli rozptylu elektrického náboje během expozice elektronovým svazkem ještě na tuto strukturu napařena tenká vrstva kovu (NiCr, Al, ...). Tato vrstva kovu je po expozici odstraněna pomocí alkalického roztoku. Části fotorezistu jsou expozicí vytvrzeny, neexponovaný rezist je následně odplaven. Vytvrzený fotorezist potom slouží jako maska při leptání struktury do křemenné desky. Leptání se provádí reaktivním iontovým leptáním (RIE – reactive ion etching) pomocí  $CHF_3$ :Ar. Po vyleptání struktury do křemenného skla se odstraní zbytek rezistu. Postup výroby fázové masky je naznačen na obrázku 3.3[2]



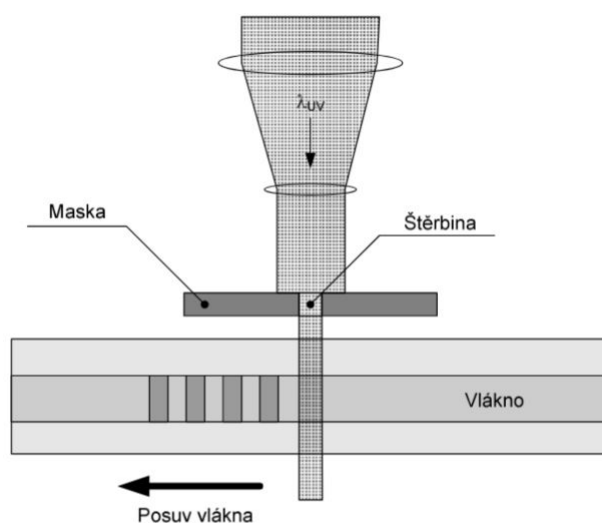
Obr. 3.3: Schéma výroby fázové masky elektrolitografií a) Nanesení fotorezistu, napaření kovové vrstvy, b) Expozice elektronovým svazkem c) Odstranění zbytku fotorezistu.[2]

Zpravidla je expozice elektronovým svazkem omezena z důvodu přesnosti na oblast do velikosti cca  $0,5 \times 0,5$  mm. Výroba potom probíhá tak, že se po expozici takového pole substrát posune pomocí mikropozičního systému a probíhá expozice další části masky. Obraz masky vytvořený v rezistu se tedy skládá z matice několika těchto segmentů. Častým problémem při výrobě delších masek je přesnost při spojování jednotlivých segmentů. Nepřesnosti způsobené spojováním segmentů způsobují náhodné změny periody masky v místě spojů. Přesnost pozičního systému je v případě výroby fázové masky elektronovou litografií limitujícím faktorem. Expozice dlouhých masek může trvat až několik hodin, v průběhu celého procesu je zapotřebí dodržovat přesnou referenční soustavu z důvodu přesného spojování segmentů. Proto je nezbytné, aby byl celý systém teplotně stabilní. Problém se spojováním segmentů odpadá v případě výroby masky holografickou metodou. Principiálně je holografická metoda kvalitnější alternativou pro výrobu fázových masek. Přesto je však výroba dlouhých masek touto metodou problematická z důvodu homogenity osvitu a potřeby velkých zrcadel. Protože holografická metoda je velice citlivá na uspořádání interferujících svazků, sériová produkce identických fázových masek touto metodou může přinášet problémy.[2]

### 3.3 Další metody výroby mřížek

#### 3.3.1 Metoda bod po bodu

Perioda vláknové mřížky na vlnové délce okolo 1500 nm je přibližně 500 nm, podle rovnice 2.1. Protože minimální velikost svazku je limitována, vzhledem k difrakci, na odpovídající vlnové délce, je možné pro vlnovou délku zapisujícího světla na 244 nm vytvořit svazek o průměru cca 250 nm. Principiálně je potom možné vytvořit mřížku tak, že se vlákno bodově osvítlí, posune o periodu a podle tohoto schématu se postupuje, dokud není vytvořena mřížka požadované délky. Tato metoda se nazývá bod po bodu (point-by-point). [1][2]



Obr. 2.15: Výroba vláknové mřížky metodou bod po bodu

Obr. 3.4: Výroba vláknové mřížky metodou bod po bodu.[2]

Technicky je možné, aby za pomoci precizního systému posunu vlákna a snímání vzdálenosti pomocí interferometru, šly vyrábět vláknové mřížky prvního řádu (FBG). Prakticky jsou, ale nároky na přesnost pozičního systému natolik vysoké, že se metoda bod po bodu používá převážně na výrobu vláknových mřížek vyšších řádů (LPFG). Byly publikovány vysokoodrazné, dlouhé mřížky s periodou vyššího řádu ( $N = 3$  a  $5$ ). Přestože mřížky s vysokou odrazivostí mohou být vyrobeny i jinými metodami (např. pomocí fázové masky), metoda bod po bodu je velice vhodná pro výrobu mřížek s velmi dlouhou periodou. Tyto mřížky vážou světlo z procházejícího vidu jedné polarizace do polarizace druhé v odrazném nebo propustném směru jako „rocking filtr“, anebo z jednoho vedeného vidu do jiného.[2]

Při výrobě obvyčejné odrazivé mřížky je vlákno osvětlováno pomocí úzkého svazku přes štěrbinu. Osvit trvá potřebnou dobu pro dosažení požadované změny v daném

místě (ať už laserem v kontinuálním režimu, sérií pulzů nebo jedním pulzem o vysoké intenzitě). Potom se vlákno posune pomocí motorizovaného mikropozičního systému o potřebnou vzdálenost a provede se osvit dalšího bodu. Tímto způsobem lze vytvořit kvalitní optickou mřížku.[2]

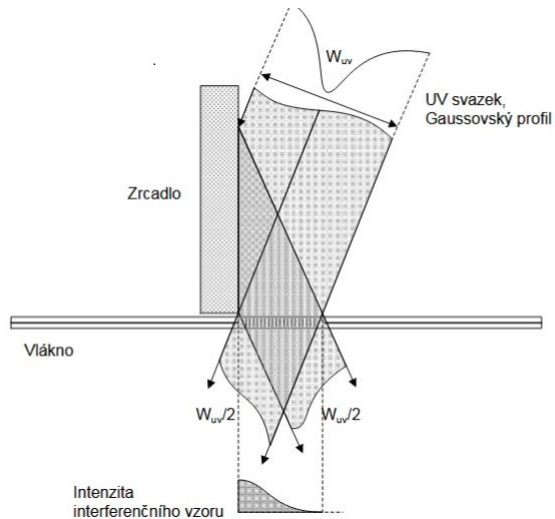
### 3.3.2 Interferometr s fázovou maskou

U této metody je fázová maska použita k rozdělení primárního UV svazku. Difrakční řády  $\pm 1$  jsou potom pomocí soustavy zrcadel přivedeny na vlákno pod požadovaným úhlem, kde interferují. Hlavním cílem této metody je použití vlnovou délkou definovaného prvku u sestav interferometru, jak znázorňuje na obrázku 3.1. Pomocí polohy soustavy zrcadel je potom možné měnit Braggovu rezonanční délku zapisované mřížky. Tato metoda má významné výhody, protože z parametrů fázové masky je známá referenční Braggova vlnová délka, pro kterou je maska vyrobena. Lze tak poměrně snadno nalézt základní polohu interferometru. Rotace zrcadel od této základní polohy znamená změnu vzájemného úhlu svazku dopadajících na vlákno, což vede ke změně Braggovy rezonanční vlnové délky. Tímto způsobem je možné vyrábět pomocí jedné masky několik mřížek s různou Braggovou rezonanční vlnovou délkou. Při difrakci světla na fázové masce vzniká více difrakčních řádů. Při použití fázové masové masky v bezprostřední blízkosti vlákna je zapisující vzor tvořen součtem všech difrakčních řádů. Protože nultý difrakční řád nemůže být nikdy potlačen úplně na nulovou intenzitu, dochází při osvitu UV zářením vyšších intenzit k interferenci 0 řádu s  $-1$  a  $+1$ . Tímto dochází ke vzniku dalších interferenčních pruhů, jejichž vzdálenost odpovídá periodě fázové masky. Tento další interferenční vzor potom způsobuje změny ve struktuře zapisované mřížky a mění tak požadované parametry vláknové mřížky.[2]

### 3.3.3 Lloydův zrcadlový interferometr

Další možností pro výrobu vláknových mřížek je použití Lloydova zrcadlového interferometru. U klasické interferometrické metody je dopadající UV svazek nejprve rozdělen na dva svazky, které jsou potom pomocí soustavy zrcadel následně spojeny. Na rozdíl od tohoto, Lloydův interferometr využívá pouze jednoho zrcadla, jak je naznačeno na obrázku 3.5





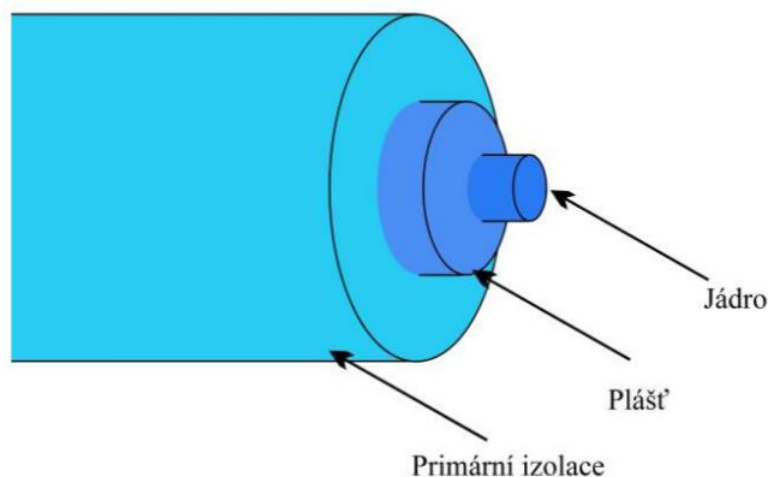
Obr. 3.5: Lloydův interferometr.

Svazek dopadající na zrcadlo pod určitým úhlem je částečně odražen před dráhu svazku. Tímto dochází k interferenci v oblasti, kde se dopadající a odražený svazek překrývají. Tento interferometr je velice jednoduchý a jeho použití je snadné. Přesto má však svoje omezení. Protože je polovina přicházejícího svazku odražena, interferenční pruhy vznikají pouze v oblasti, jejíž délka odpovídá polovině vlnové délky.

## 4 Struktura optického vlákna

Optické vlákno se velmi často vyrábí z oxidu křemičitého ( $SiO_2$ ) a polymerního povlaku. Je složeno z vnitřního válce o průměru několika mikrometrů (jádro) obklopeného vnější válcovou vrstvou s menším indexem lomu (plášť), jak je vidět na obrázku 4.1. Rozdíl indexu lomu zajišťuje úplné odrazy v rozhraní jádro-plášť, umožňující šíření světla ve vlákně. Primární ochrana je ochranná vrstva nanesená na plášť vlákna, během procesu tažení, aby vlákno bylo chráněno proti atmosferickým vlivům. Hlavní úlohou primární ochrany je potlačení vzniku trhlin nebo poškození vnějšími mechanickými vlivy.

Optická vlákna mají obvykle průměr 125  $\mu m$ . Oxid křemičitý ( $SiO_2$ ) je sklovitý materiál, jehož hodnota modulu pružnosti se pohybuje okolo 72  $kN/mm^2$ . Z toho plyne, že vlákno může vydržet prodloužení až na 2 - 8 %, proto je tedy možné vlákna použít jako snímače posunu např. kompozitních struktur[14]



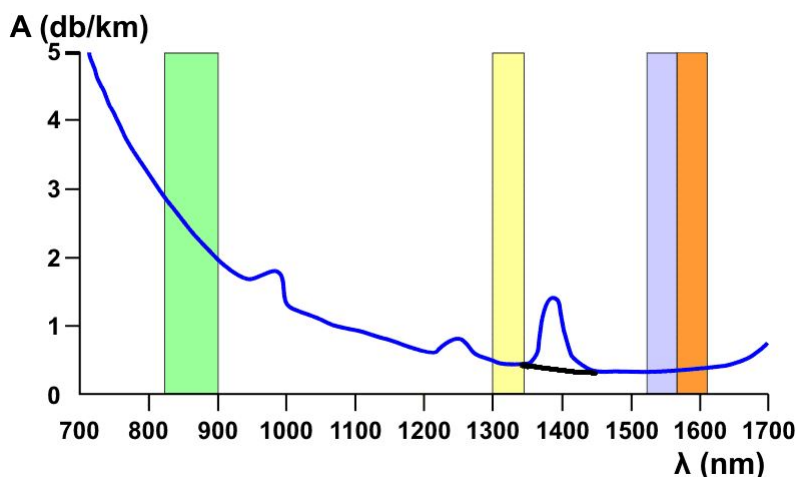
Obr. 4.1: Typické standardní vlákno[13].

### 4.1 Materiál pro výrobu optických vláken

Čistý oxid křemičitý  $SiO_2$  má v infračervené oblasti spektra oblasti s velmi nízkým útlumem, takzvaná telekomunikační okna. Útlum křemenného skla na velkých vlnových délkách prudce klesá. Minimální útlum má oxid křemičitý kolem vlnové délky 1550 nm. Od vlnové délky 1600 nm útlum opět začíná stoupat. V oblasti s nízkým útlumem je na křivce několik pahorků způsobených hlavně OH ionty, tedy disociovanou vodou nacházející se uvnitř materiálu vlákna (například útlumové maximum na vlnové délce 1397 nm). Proto musí být ve vlákně obsah vody minimalizován. To je

také důvodem, proč jsou optická vlákna extrémně citlivá na navlhnutí (vlhkost způsobuje jejich tzv. oslepnutí), a musí být před vlhkostí pečlivě chráněna ochrannými obaly bezprostředně ihned po procesu tažení.

Aby vlákno fungovalo, musí mít jeho jádro index lomu vyšší (cca o 1%) než plášť. Bohužel křemenné sklo má hodnotu indexu lomu pouze kolem 1,544 a příměsemi se dá zvyšovat, ale téměř ne snižovat. Proto se jádro nevyrábí z čistého křemenného skla, ale ze směsi křemenného a germaniového skla  $GeO_2$ , které má vyšší index lomu a téměř nezměněný útlum.[15]



Obr. 4.2: Útlum optického vlákna v závislosti na vlnové délce.[16].

Pro přenos informací optickým vláknem se používají vlnové délky, které vykazují lokální minimum měrného útlumu. Těmito oblastem se říká okna.[16] [21]

**I. okno (850 nm)** toto okno se využívá v mnohavidovém šíření. Útlumová charakteristika je zde silně klesající a dosahované hodnoty měrného útlumu jsou pro využití v dálkových přenosech příliš vysoké. Díky levným zdrojům záření se přenos využívá u optických přístupových sítí.

**II. okno (1280 až 1335 nm)** je nejnižším oknem a využívá se pro jednovidový přenos. Typicky dosahovaná hodnota měrného útlumu je  $0,35\text{dB}/\text{km}$ . Toto okno je využíváno pro dálkové přenosy.

**III. okno (1530 až 1565 nm)** okno minimálním měrným útlumem pro standardní křemenné vlákna, typicky  $0,19 \div 0,22\text{dB}/\text{km}$ . Toto okno je využíváno pro dálkové přenosy.

**IV. okno (1565 až 1625 nm)** toto okno se nachází za minimem měrného útlumu. Využívá se ve spojení s III oknem ve WDM přenosech.

**V. okno (1335 až 1530 nm)** toto okno se začalo využívat až koncem 90. let, kdy byly zvládnuty technologie výroby optických vláken natolik, že se ztrácí lokální

maximum na 1380 nm. Spojení II. až V. okna vytváří souvislý přenosový kanál o šířce pásma až 50 THz.

Pro výše zmíněné přenosy je možné dle ITU-T (skupina G), využít tato jedno-vidová vlákna:[21]

**Vlákno typu G.652** je standardní optické jednovidové vlákno 9/125  $\mu\text{m}$ . Tato vlákna jsou nazývána Matched Cladding (MC), vzhledem k typické skokové změně indexu lomu na rozhraní jádra a pláště vlákna. Zvláštní skupinu tvoří vlákna s tzv. vnořeným indexem lomu, u kterých je index lomu pláště v okolí jádra nižší než v samotném plášti optického vlákna, které je vyrobeno z čistého křemičitého skla bez dodatečných příměsí.

**Vlákno typu G.652.C** jako nový druh je dnes k dispozici vlákno typu G.652.C, které lze na rozdíl od běžného vlákna G.652 provozovat v celém rozsahu vlnových délek a využít všechna dostupná přenosová pásma, včetně pásma E (1360 – 1460 nm). To dříve nebylo možné využít, protože klasická optická vlákna mají v této oblasti zvýšený vložný útlum vlivem rezonancí na absorbovaných iontech vody OH<sup>-</sup>, které se do vlákna dostaly při výrobě.

**Vlákno typu G.652.D** All Wave vlákno, je kompatibilní se všemi vlákny H.652.

**Vlákna typu G.653** byla vyvinuta s cílem potlačení chromatické disperze pro vlnovou délku 1550 nm. Tato vlákna se označují jako vlákna DSF (Dispersion Shifted Fiber). Používají se pro vyšší přenosové rychlosti na velké vzdálenosti s jedinou provozovanou vlnovou délkou. Jakmile však bylo třeba nasazovat v praxi systémy vlnového multiplexu DWDM s více vlnovými délkami, zjistilo se, že tato vlákna mají vedlejší efekt. Ten spočívá v překrývání jednotlivých vlnových délek a vytváření vedlejších parazitních kanálů a přeslechů.

**Vlákna typu G.654** byla vyvinuta jako speciální varianta vláken G.652. Tato vlákna jsou optimalizována pro co nejnižší vložný útlum v pásmu 1550 nm a mají posunutou mezní vlnovou délku (vlnová délka, do které fungují jako jednovidová). Jsou nákladná, používají se téměř výhradně k extrémním dálkovým přenosům pro podmořské kabely bez zesilovače na trase.

**Vlákna typu G.655** s posunutou nenulovou disperzí (NZ-DSF, Non Zero – Dispersion Shifted Fiber) jsou optimalizována pro přenosovou oblast v pásmu 1550 nm. Tato vlákna se dnes používají především v dálkových optických sítích. Na rozdíl od vlákna typu G.653 nemají nulovou disperzi pro vlnovou délku 1550 nm. Malá nenulová disperze je nutná, aby se zde příliš neprojevovaly vedlejší nelineární efekty. Tento typ vlákna je určen k provozu technologie DWDM a pro vysoké přenosové rychlosti.

**Vlákna typu G.656** s posunutou nenulovou disperzí (NZ-DSF, Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) jsou optimalizována pro přenosovou oblast v pásmu 1460 - 1625 nm. Tato vlákna jsou určena pro systémy vlnového multiplexu DWDM a

CWDM. V pásmu S umožňují u systému DWDM až 40 kanálů.

**Vlákno typu G.657.A** pro vnitřní kabeláže a pro optické přístupové sítě.

**Vlákno typu G.657.C** nový typ vlákna, které je odolné na mikroohyby, do poloměru 5 mm.

## 4.2 Primární izolace

Všechna vyráběná optická vlákna jsou pro běžná použití velice křehká, proto jsou z výroby opatřena minimálně primární izolací, která zlepšuje mechanické vlastnosti vlákna. Primární ochrana je většinou akrylový nebo polyimidový povlak, který výrazně zlepšuje možnost ohybu vlákna.

### 4.2.1 Stripování vlákna

Pro vytvoření Braggovi mřížky, nebo jakékoli strukturu která mění index lomu v optickém vlákne je nutné primární izolaci odstranit. Další ochrany nebývají připojeny pevně k vláknům, a proto není složité je odstranit. Správné odstranění primární ochrany je však nesmírně důležité. U optických vláken je možné použít několik způsobů odstranění primární ochrany. Nejčastěji používaná metoda pro odstranění primární ochrany je metoda mechanická, která je nejméně nákladná. Pomocí tzv. stripovacích kleští se stáhne primární izolace. Kleště, ale mohou nechat v plášti optického vlákna malé prasklinky, které jsou důsledkem mechanického stresu. Pro vlákna, ve kterých je následně vytvořena Braggova mřížka je tato metoda krajně neuspokojivá, protože při mechanickém tlaku často dochází ke zlomení vlákna. Další metodou je chemické odstranění, tato metoda se nevyužívá z důvodu natečení chemikálií do mikrostruktury. Pro odstranění primární izolace je proto třeba použít speciálních metod, které izolaci odstraňují šetrněji například pomocí proudu teplého vzduchu. Vysoká teplota zajistí roztavení akrylového povlaku a vysoký tlak vzduchu odstraní všechny nečistoty a potenciální zbytky. Vlákno je tak připraveno na další práci bez nutnosti dalšího čištění.[16]

Významnou skupinou primární ochrany je polyimidová izolace má výrazně lepší tepelnou i chemickou odolnost, proto se odstranění u standardních vláken provádí mnohem agresivnějšími metodami. Tyto metody jsou podstatně časově a ekonomicky náročnější. Často se používá zahřátá kyselina, nebo se povlak jednoduše spálí pomocí plynového hořáku. Obě tyto metody způsobují drobné poškození samotného vlákna.

### 4.2.2 Stripovací automat 3SAE-ASII

AutoStrip II je navržen pro rychlé strippování optických vláken bez chemikálií. Toto zařízení je možné využívat pro vlákna s akrylátovou primární ochranou jejichž průměr je až 1,000  $\mu\text{m}$ . AutoStrip II splňuje požadavky strippování s proměnnou délkou, vysokou pevností a čistotou. Při správném nastavení zařízení okamžitě odpaří primární ochranu vlákna. Výsledek je čisté, strippované vlákno s podstatně vyšší pevností, než u jakékoliv mechanické metody strippování. Výrobce uvádí, že vlákno by mělo být bez nečistot i při 400x zvětšení. Zařízení je také možné nastavit tak, aby zároveň provedlo zkoušku tahem. Pro přesné nastavení je tento systém řízen mikroprocesorem. Zařízení dokáže vyvinout tah až 20 N. [17]



Obr. 4.3: Stripovací automat 3SAE-ASII.[17].

## 5 Apodizace

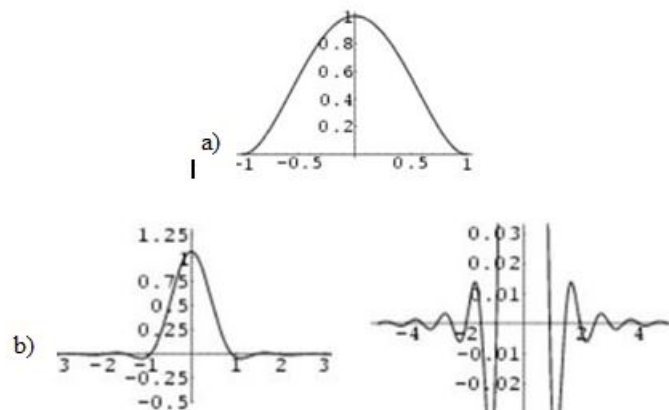
Apodizované mřížky mají konstantní periodu změny indexu lomu. Apodizace mění amplitudu indexu lomu a potlačujeme pomocí ní postranní laloky spektra odraženého optického signálu. Tyto postranní laloky (pásma) jsou nežádoucí, proto se je snažíme potlačit na co nejmenší hodnotu, abychom zlepšili odstup signálu od šumu OSNR (Signal to Noise Ratio). Existuje více apodizačních profilů Braggových mřížek. Jako například: connes, cos, cosn, gauss, tanh, Hamming. Apodizace v praxi odpovídá modulaci indexu lomu vlákna mřížky s mnohem větší periodou než je perioda mřížky. Toho může být dosaženo použitím různých technik, jako je například vystavování optického vlákna interferenčnímu obrazci složenému ze dvou paprsků s málo odlišnou frekvencí. Další možné způsoby jsou využití fázové masky nebo variabilní fázové masky. Důležitou vlastností, pro kterou se vyrábějí apodizované vláknové mřížky, je potlačení nechtěného optického šumu.[1][5] Mřížky s odrazivostí 20 % označujeme jako nízko odrazivé a mřížky, které mají odrazivost 95 % označujeme jako vysoce odrazivé. Nízkoodrazivá mřížka má větší odstup šumu v blízkém i vzdálenějším okolí, než vysoce odrazivá mřížka.[5]

### 5.1 Druhy apodizačních funkcí

#### 5.1.1 Apodizační funkce Connes

Na obrázku 5.1 je znázorněn průběh apodizačního profilu Connes. Rovnice 5.2 uvádí matematický zápis této funkce.[5]

$$f_A(z) = N_{max} \times \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^2 \quad (5.1)$$



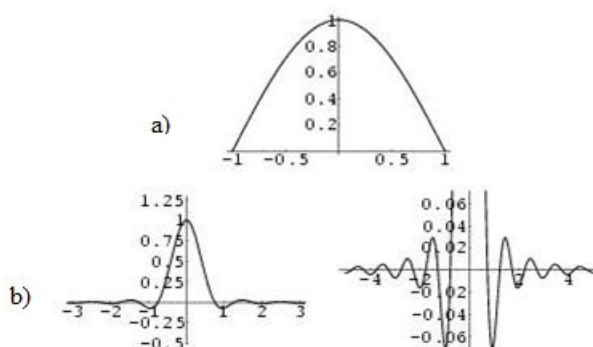
Obr. 5.1: Apodizační profil funkce Connes.[4]

Na výše uvedeném obrázku 5.1a) je znázorněn průběh apodizační funkce Connes. Na obrázku 5.1b) je uveden průběh odraženého paprsku na apodizované Braggově mřížce. V pravé části obrázku jsou průběhy postranních laloků.

### 5.1.2 Apodizační funkce Cosine

Apodizační funkce cosine má nenulové koeficienty, a to jí dává dobré možnosti pro apodizaci optických vláknových mřížek. Funkce cosinus je druh Hammingovy funkce.[5] Předpis funkce je:

$$f_A(z) = N_{max} \times \cos\left(\frac{\pi \times x}{2 \times a}\right) \quad (5.2)$$



Obr. 5.2: Apodizační profil funkce Cosine.[4]

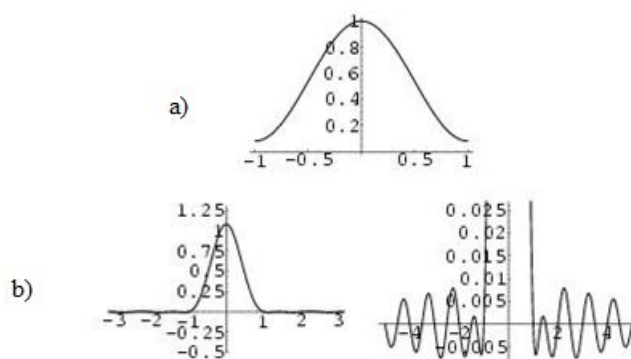


Na výše uvedeném obrázku 5.2a) je znázorněn průběh apodizační funkce Cosine. Na obrázku 5.2b) je uveden průběh odraženého paprsku na apodizované Braggově mřížce. V pravé části obrázku jsou průběhy postranních laloků.

### 5.1.3 Apodizační funkce Hamming

Tuto funkci navrhnul Richard W. Hamming. Funkce je optimalizována tak, aby nejbližší postranní laloky byly co nejmenší, což je ve výšce asi jedné pětiny tohoto okna. Hammingova funkce potlačuje postranní laloky o více než 40 dB, což znamená dobrou volbu pro přesné systémy, jako je zpracování 8-bitových audio signálů.[5] Předpis funkce je:

$$f_A(z) = N_{max} \times 0,54 + 0,46 \times \cos\left(\frac{\pi \times x}{a}\right) \quad (5.3)$$



Obr. 5.3: Apodizační profil funkce Hamming.[4]

Na výše uvedeném obrázku 5.3 a) je znázorněn průběh apodizační funkce Hamming. Na obrázku 5.3b) je uveden průběh odraženého paprsku na apodizované Braggově mřížce. V pravé části obrázku jsou průběhy postranních laloků.

## 5.2 Základní metody vytvoření apodizované mřížky

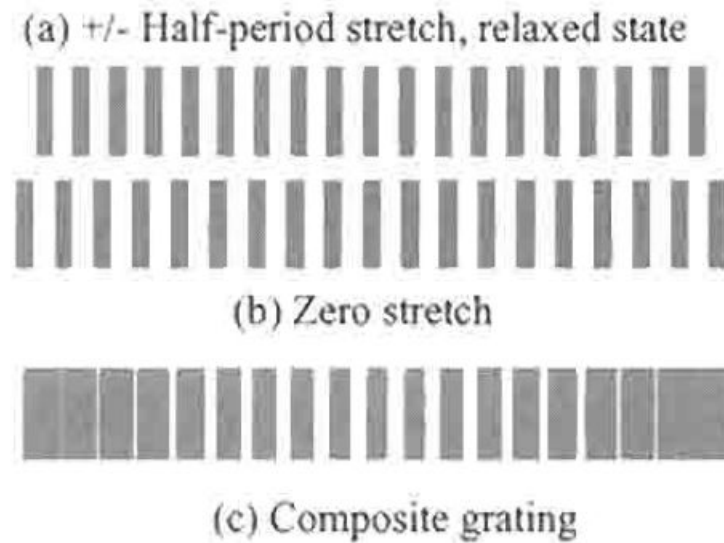
V této kapitole budou charakterizovány jednotlivé postupy, které zajišťují vytvoření optimální apodizované mřížky. Pro apodizaci je možné použít metodu mechanickou nebo optickou, nebo jejich kombinaci.

Mechanické techniky jsou tvořeny mechanickým natažením vlákna na jeho okrajích nebo střídavým natahováním a smšťováním.[1]

### 5.2.1 Vytvoření apodizované mřížky symetrickým protažením

Pružné zápisy apodizace vyžadují velmi přesné natažení a tedy i řízení, které je zajištěno počítačovým softwarem. Je žádoucí, aby bylo stejným způsobem synchronně ovládáno zařízení, které bude použito ke změně indexu lomu vlákna. Nejčastěji se používá UV laser.

Mechanická metoda, kdy je využito flexibility optického vlákna se jeví jako jednodušší např. při použití fázové masky. V tomto případě je tato metoda podstatně rychlejší a je také pravděpodobně vhodnější pro hromadnou výrobu např. v telekomunikacích nebo senzorovou techniku. Negativní faktor této metody je výrazná cena fázové masky, která je navíc velmi křehká a náchylná k mechanickému poškození. Dalším úskalím může být, ne zcela předvídatelné chování při výrobě apodizované mřížky. Také je nutné brát v potaz délku fázové masky v závislosti na mřížce. Při výrobě apodizovaných mřížek je nutná modulace indexu lomu, ten na okrajích mřížky je výrazně menší nebo nulový. Vlnová délka Braggovy mřížky může být změněna v závislosti natažením vlákna před zápisem. Vytvořené mřížky jsou zapsány na stejném místě optického vlákna, avšak se odlišují délkou, která je změněna o jednu periodu. V této fázi je třeba důsledně dbát na správnou relativní fázi obou mřížek. Jednou z možností je použití symetrického napínání vláken při zápisu mřížky. Symetrická metoda apodizace (SEM) je využívána z důvodů jednoduché obsluhy, při které lze použít jakýkoliv typ mřížky. Jak je patrné na obrázku 5.5.[1]

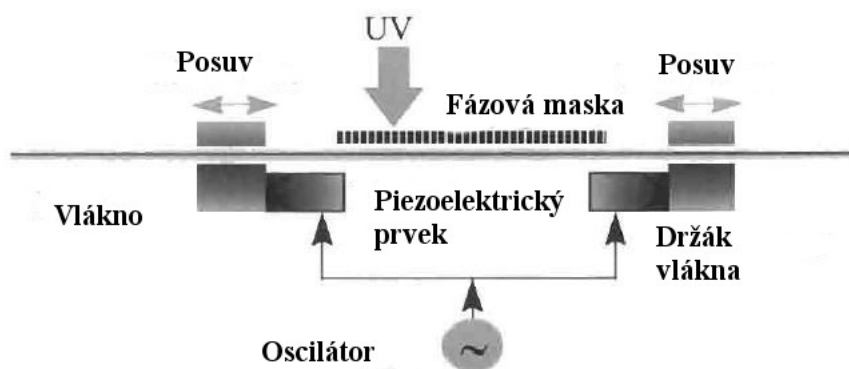


Obr. 5.4: Schéma symetricky nataženého vlákna pro apodizovanou mřížku .[1]

Zobrazená technika může být chápána následovně: 5.5a) Nejprve je zapsána mřížka v základním natažení. Na obrázku 5.5a) je druhá struktura ve vlákne posunuta o jednu periodu

Na obrázku 5.5 jsou vidět, že na středu jsou mřížky překryty ve fázi, zatímco dále od středu jsou stále více mimo fázi. Na okraji jsou posunuty přesně o půl periody. Zvláště u dlouhých mřížek je obtížné zajistit, aby obě mřížky obdržely stejnou dávku UV záření. Tento problém by měl být vyřešen kontinuálním natahováním a zkracováním vlákna. K tomuto účelu lze použít dvou piezoelektrických prvků. Pokud je vlákno periodicky napínáno správnou frekvencí, výsledkem by měla být dokonale apodizovaná mřížka. Apodizační funkce má často pulsusovou periodu, která má tvar připomínající obálku. Pokud je UV záření působící na vlákno statické, není nutné brát v potaz frekvenci napínacího mechanismu. Je třeba nastavit dostatečně nízkou energii UV svazku tak, aby bylo možné vytvořit mřížku, která musí být výrazně delší, než je frekvence oscilátoru, který zajišťuje napínání vlákna. Tato podmínka je obecně splněna pokud není mřížka zaznamenána v jediném pulsu laseru. Výjimku tvoří případ, pokud by každá poloha byla zaznamenána právě v jednom pulsu. Systém apodizace je nezávislý na délce mřížky, jedinou podmínkou je, aby vlákno bylo napínáno o polovinu periody v každém směru, jak již bylo zmíněno výše. V případě, že je chirpovaná mřížka na jednom konci natažená více než na druhém, je vhodné na této straně provést úpravu natažení. Tento způsob je velmi snadno použitelný při relativně krátkých mřížkách. Další možností této metody je zapsat dvě mřížky přes sebe staticky tak, aby byla vytvořena moaré struktura. Další

možností apodizace je vypnutí jednoho upínacího prvku a tím bude mřížka apodizována pouze na natažené straně. V důsledku toho může být prováděn zápis levého a pravého konce nezávisle. [1]



Obr. 5.5: Mechanický model pro symetrické natažení vlákna.[1]

Stejně jako u stupňovité fázové masky je možné kombinovat apodizaci a chirpovanou mřížku ve fázové masce. Symetrická metoda apodizace umožňuje tyto dvě metody kombinovat a může je aplikovat na jakoukoliv délku mřížky, aniž by bylo nutné brát ohledy na velikost fázové masky.

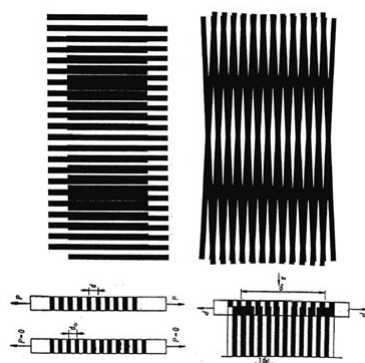
Metoda SAM je vynikající pro dlouhé mřížky, protože není zapotřebí tak velké napnutí mřížky a zároveň doba expozice je i při nízkých intenzitách UV záření přijatelná. Např. pro mřížku o velikosti 1 mm musí být vlákno nataženo o 0,1%. Avšak v případě, že je mřížka dlouhá 10 mm namáhání vlákna je výrazně sníženo, protože natažení vlákna je dostatečné o 0,01%. Stále je však nutné zajistit, aby exponovaný úsek byl symetrický, jinak proces apodizace nebude proveden správně a výsledky budou neuspokojivé.[1]

## 6 Metoda moaré

Moaré metody jsou založeny na principu projekce dvou pravidelných struktur na měřený povrch. Pravidelnou strukturou mohou být lineární mřížky, radiální mřížky, matice bodů apod. Obecně koincidence těchto dvou struktur vyvolá vznik třetí struktury pozorovatelné na povrchu měřeného předmětu. Jedná se o superpozici dvou mřížek s mřížkovou konstantou  $l$ . Pokud jsou projektovány paralelně na sebe, nedochází ke vzniku dalších struktur. Pokud však natočíme jednu nebo obě mřížky vůči sobě o úhel  $\alpha$ , vznikne další struktura s periodou  $L$  (viz. obrázek 6.1)[8][9][11]

Pro malé úhly  $\alpha$  je  $L = l/\alpha$ . Pokud promítneme jednu z mřížek na zkoumaný povrch, dojde vlivem tvaru povrchu k deformaci této mřížky. Po superpozici s druhou mřížkou, která bude nedeformovaná - referenční, dojde ke generaci moiré proužků.[8][10] Platí vztah:

$$L = \frac{l}{2 \times \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (6.1)$$



Obr. 6.1: Základní typy mřížek a vznik moaré pruhů.[11]

## 7 Optická vlákna jako senzor

Využití optovláknových senzorů nastalo prakticky současně s nástupem optických vláken do průmyslové praxe. Tento typ senzorů byl poměrně finančně náročný, a proto rozvoj nebyl tak rychlý jako využití optovláken pro datové přenosy. Obecně jsou optovláknové senzory schopné měřit většinu fyzikálních veličin a v řadě případů dosahují podstatně lepších výsledků než jiné typy senzorů. Obecnou vlastností senzorů v elektrotechnice je převod elektrické či neelektrické veličiny na elektrický signál, který mohou zpracovat elektrické obvody. V současnosti se optovláknové senzory využívají nejčastěji k měření teploty a mechanického namáhání. Proto lze optické senzory dnes nalézt jako detektory vibrací, deformací, lokalizace objektu apod. Při srovnání optovláknových senzorů s konvenčními typy čidel mají tyto optovláknové senzory řadu výhod, zejména dielektricitu a konstrukci z elektricky nevodivých materiálů. Proto jsou vhodné pro výbušná prostředí, oblasti vysokého elektrického napětí, nejsou ovlivňovány elektromagnetickým polem.[5][7]

Optovláknové senzory bez problémů pracují v širokém rozsahu provozních teplot. Jsou v základu vyrobeny z inertního materiálu, jehož základem je křemenné sklo, které je chemicky pasivní, nepodléhá korozi a nekontaminuje měřené prostředí.[5][7]

Obvyklé dělení optovláknových senzorů je v literatuře uváděno následovně:

1. Senzory extrinsické – optické vlákno je využito k přenosu informace, tedy změřená veličina je odeslána po vlákne do sběrové jednotky.
2. Senzory instrinsické – optické vlákno je využito jako detektor a změřená hodnota je odeslána pomocí jiného média.
3. Senzory smíšené – jsou tvořené dvěma vlákny, mezi nimiž je určitá vazba, např. čidlo polohy, biochemický senzor pro detekci rezonanční excitace povrchových plazmonů.

Z hlediska konstrukce či prostorového uspořádání lze rozlišovat senzory: bodové, rozprostřené a polorozprostřené. Jak již bylo uvedeno, mohou optické senzory měřit prakticky libovolnou fyzikální veličinu. Podle charakteru působící fyzikální veličiny, která způsobí patřičnou změnu, jsou senzory založené na změně:

- Indexu lomu optického vlákna,
- Absorpce,
- Emise případně fluorescence.

Dále pak podle způsobu modulace optického signálu rozlišujeme senzory:

- Amplitudové,
- Fázové,
- Polarizační,
- S modulací vlnové délky,
- S modulací časového rozšíření impulsu.

Jiné dělení optovláknových senzorů je podle technologie, která je použita. To je dáno principem činnosti a aplikace senzoru. Takže aplikační rozdělení dle měřené veličiny:

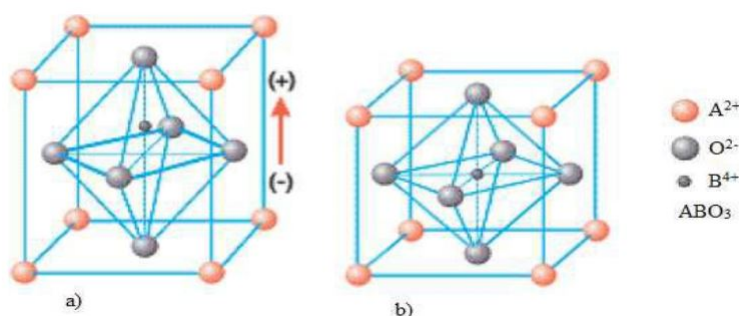
- Mechanické napětí – statické – dynamické (FBG senzory),
- Deformace – změny tvaru materiálu (FBG, SOFO, Optický mikrofon),
- Teplota (FBG, PIR, DTS),
- Tlak (FBG, Optický mikrofon),
- Vlhkost,
- Viskozita,
- Posuv (FBG, Vláknový gyroskop),
- Vibrace (FBG, Vláknový gyroskop, Optický mikrofon),
- Elektrické pole,
- Elektromagnetické pole,
- Zvuk (DAS, Optický mikrofon),
- Rotace,
- Zrychlení.

## 8 Piezoelektrický jev

Piezoelektrické látky jsou zvláštní skupinou dielektrik, ve kterých existuje piezoelektrický jev jako určitý druh jejich elektrické deformace. Je to schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování, nebo také jev opačný, kdy je na krystal přiloženo napětí a on se tvarově deformuje. Tento jev se vyskytuje pouze u krystalů bez středu symetrie.[18]

### 8.1 Princip piezoelektrického jevu

Princip piezoelektrického jevu vzniká v mikrostruktuře materiálu. Krystal je složen z iontů, které jsou vázány na určitých místech v pravidelně uspořádaném a opakujícím se vzoru, toto uspořádání tvoří krystalovou mřížku. Nejmenší periodicky se opakující část mřížky je elementární buňka, proto symetrické vlastnosti této buňky rozhodují, zda může mít krystal piezoelektrické vlastnosti. Piezoelektrický jev se vyskytuje jen u krystalů, které nemají střed symetrie. Ionty v buňkách bez středu symetrie se vlivem mechanického namáhání přesouvají a tím vytváří elektrický dipól. Ionty v buňkách se středem symetrie na obrázku 8.1 takový dipól vytvořit nemohou.[18]



Obr. 8.1: Krystalická mřížka a) buňka bez středu symetrie b) buňka se středem symetrie.[18]

V podstatě je to schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování. Napětí bývá řádově  $10^{-7} V/Pa$ . Také je možné aby tento jev fungoval i reverzně. Na krystal je přivedeno napětí a tím se deformuje. Tyto děje je možné rozdělit na přímý piezoelektrický jev a nepřímý piezoelektrický jev. Podstata tohoto jevu je, že v klidovém stavu jsou polohy kladných a záporných nábojů po vystředění přes objem buňky shodné a materiál nevykazuje žádné elektrické projevy. Pokud na něj začne působit mechanická síla, jako je stlačení, tah, ohyb, nebo stříh, posunou se polohy



nábojů tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů (nábojů), která v nezdeformovaném krystalu souhlasí, se od sebe vzdálí a na určitých plochách krystalu se objeví náboj. Je možná i kombinace směrů mechanického namáhání. Při obráceném piezoelektrickém jevu, při takzvané elektrostrikci, způsobí vnější elektrické pole posunutí iontů a to se projeví zdeformováním krystalu.[18]

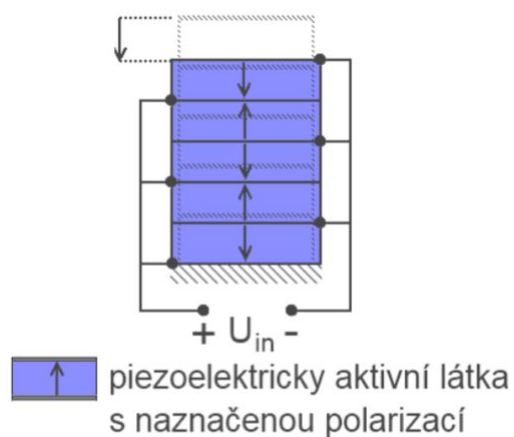
## 8.2 Piezoelektrické mikroaktuátory

Aktuátory založené na piezoelektrických materiálech mají několik dobrých charakteristik například: výbornou přesnost polohování, dynamiku pohybu, vysoký poměr generované síly vzhledem k rozměrům a vysoká tuhost. Hodnoty maximální deformace jsou poměrně malé od 0,1 % do 1 %, proto jsou určeny především pro mikropolohování. Výhodou je relativně vysoká účinnost přeměny elektrické energie na mechanickou cca 50 % a vysoká mechanická životnost a odolnost vůči vlivům okolního prostředí.

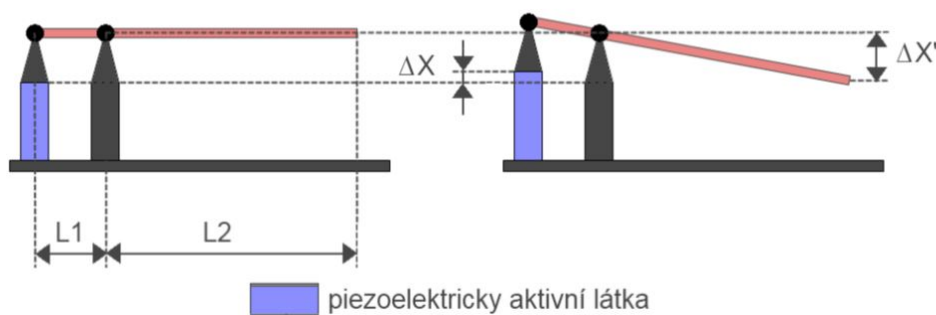
Nevýhoda je vysoká hodnota ohmického odporu takového materiálu, a proto se využívá především napájení střídavým proudem o vysoké frekvenci. Piezoelektrický materiál se zdá jako nejlepší volba pro návrh mikroaktuátoru.[19]

### 8.2.1 Mnohovrstvý mikroaktuátor

Jedná se o kompozitní mnohovrstvou strukturu s více jak dvěma vrstvami piezoelektricky aktivního materiálu. Takto uspořádaných destiček může být i několik desítek. Vyznačuje se větší účinností, umožňuje větší rozsah posuvu za užití řádově menšího napětí a mnohem větší sílu, kterou je aktuátor schopen vyvinout. V praxi se používá několik jednoduchých principů pro zesílení amplitudy výchylky koncového bodu.[19]



Obr. 8.2: Krystalická mřížka a) buňka mez středu symetrie b) buňka se středem symetrie.[19]



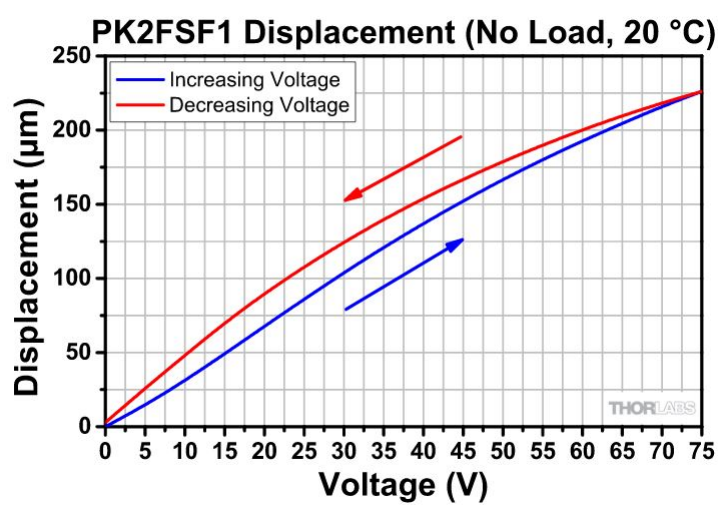
Obr. 8.3: Příklad zvětšení rozsahu pohybu vícevrstevných piezoelektrických akčních členů.[19]

### 8.3 Piezoelektrický aktuátor PK2FSF1

Piezoelektrický aktuátor PK2FSF1 je založen na stejné struktuře jako PK2FSP2, který se skládá z více čipů. Prodloužení délky posuvu byl doplněn o pákový mechanismus. Nabízí maximální zdvih  $220 \mu\text{m} \pm 15 \%$ . Piezoelektrický modul je vytvořen z PZT keramiky, která je umístěna v obalu, který zajišťuje ochranu proti atmosférickým vlivům.[20]

Tab. 8.1: Základní parametry piezoelektrického aktuatoru PK2FSF1[20]

Řídící rozsah	Maximum: 0 - 75V
Posuv při 75V	220 $\mu m \pm 15 \%$
Maximální síla v tlaku	100N
Hystereze	<15 %
Rezonanční frekvence	1,0 kHz
Pracovní teplota	-25°C – 130°C
Maximální síla v tahu	5N



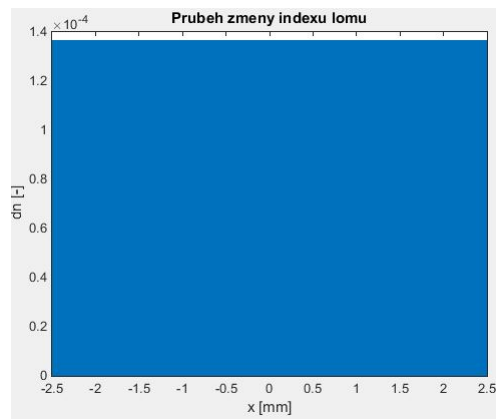
Obr. 8.4: Příklad polymorfní struktury.[20]

## 9 Simulace apodizované Braggovy mřížky

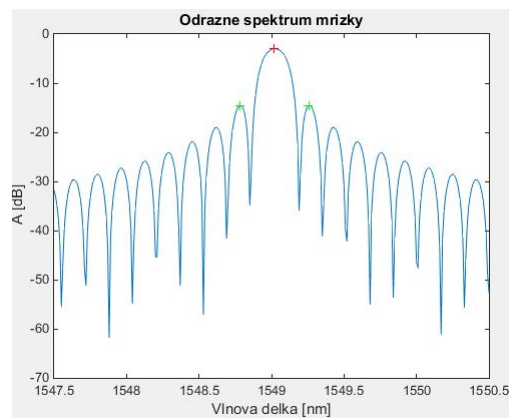
Aby mohly být vytvořeny uspokojivé výsledky praktického měření bylo nejprve nutné stanovit teoretické hodnoty, ke kterým je třeba se co nejvíce přiblížit. Z toho důvodu byl použit již vytvořený program, v kterém bylo možné simulovat potřebné výstupní parametry. Program byl vytvořen ve vývojovém prostředí Matlab. Vývojové prostředí Matlab bylo zvoleno z důvodu, že má implementované metody pro velké množství matematických funkcí a práce v tomto prostředí je velice přehledná i v případě relativně složitých úkolů. Drobnou nevýhodou se stává fakt, že Matlab je tzv. skriptovací jazyk, a při výpočtech nemusí dosahovat takových rychlostí, jako programy přeložené do strojového kódu. Model je poměrně rozsáhlý a obsahuje značné množství vstupních parametrů.

Cílem těchto simulací bylo stanovit ideální výstupní hodnoty pro dané mřížky. Nejprve byly simulovány mřížky s kontinuálním indexem lomu, poté byly simulovány i mřížky apodizované, a to pro mřížky o velikosti 3,5; 5; 10; 15 mm s odrazivostí 10 %, 50 % a 80 %. Dále byly nasimulovány u všech velikostí mřížek chybové hodnoty, které se mohly vyskytnout. Jedná se především o špatnou souosost středu vlákna se středem laserového svazku, ale také například špatné natažení vlákna. Konkrétně byly simulovány hodnoty, kdy bylo vlákno nataženo s přesahem 0,2 velikosti mřížky a nedotažení také 0,2 velikosti mřížky. Dále pro veškeré již zmiňované možnosti byly simulovány parametry nesouososti vlákna s laserovým svazkem. Také byly nasimulovány ideální hodnoty pro odlišný průběh indexu lomu, konkrétně pro tvar „půl obálky“. Z důvodu omezených parametrů laserové sestavy nebyl tento profil realizován prakticky. Veškeré proměnné parametry byly zaznamenávány. Jednalo se především o vstupní parametry: index lomu, perioda, offset, délka mřížky. A výstupní parametry střední vlnová délka (CWL), šířka pulzu na úrovni poloviny maxima (FWHM), odrazivost (R), odstup signálu od šumu (OSNR). Veškeré simulované hodnoty jsou vloženy v příloze A.

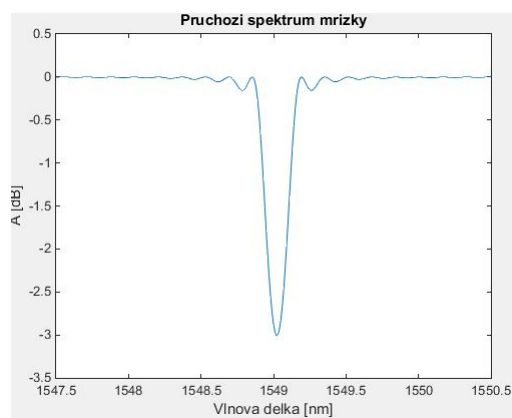
Pro názornost jsou zde uvedeny simulované parametry pro neapodizovanou a apodizovanou mřížku s odrazivostí 50 % a 80 %:



Obr. 9.1: Neapodizová mřížka: závislost indexu lomu na délce mřížky, odrazivost 50 %.



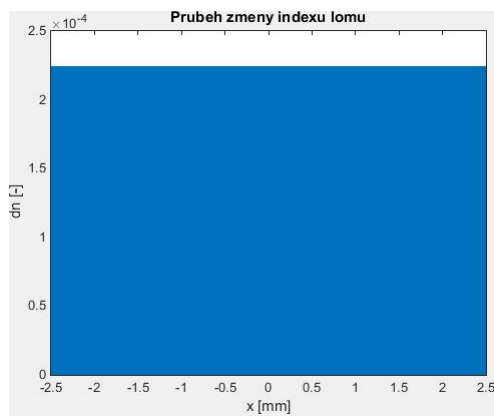
Obr. 9.2: Neapodizová mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 50 %.



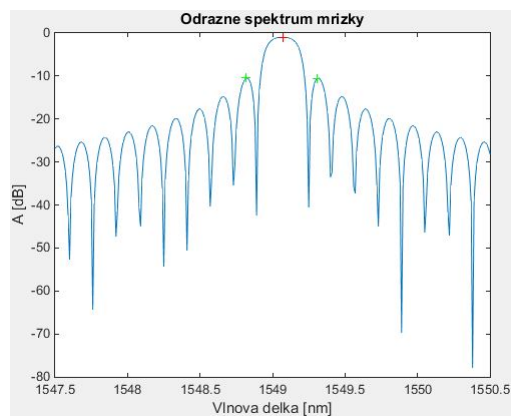
Obr. 9.3: Neapodizová mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 50%.

Tab. 9.1: Simulované hodnoty pro neapodizovanou mřížku, odrazivost 50 %.

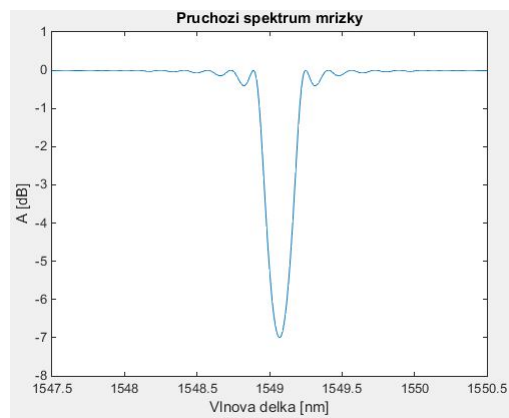
L [mm]	$\Lambda$ [nm]	dn $\cdot 10^4$	Offset [ $\mu$ m]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]
5	527,5	1,366	0	1	1549,02	50,0016	182,6599	11,5033



Obr. 9.4: Neapodizová mřížka: závislost indexu lomu na délce mřížky, odrazivost 80 %.



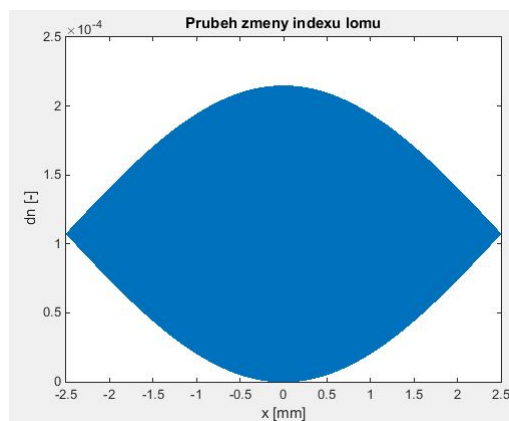
Obr. 9.5: Neapodizová mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 80 %.



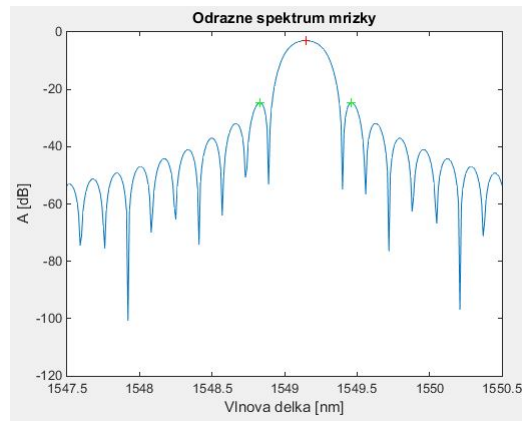
Obr. 9.6: Neapodizová mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 80%.

Tab. 9.2: Simulované hodnoty pro neapodizovanou mřížku, odrazivost 80 %.

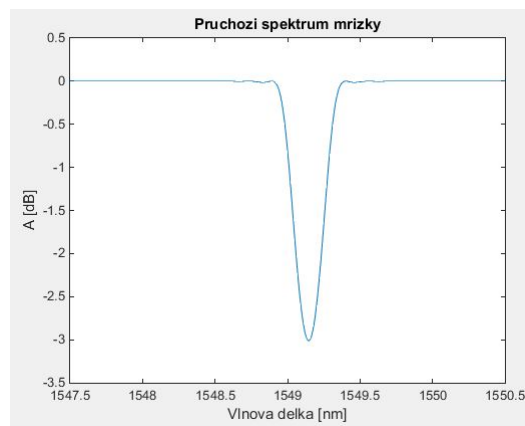
L [mm]	$\Lambda$ [nm]	dn $\cdot 10^4$	Offset [mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]
5	527,5	2,239	0	1	1549,07	80,0574	234,8081	9,5252



Obr. 9.7: Apodizová mřížka: závislost indexu lomu na délce mřížky, odrazivost 50 %.



Obr. 9.8: Apodizová mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 50 %.

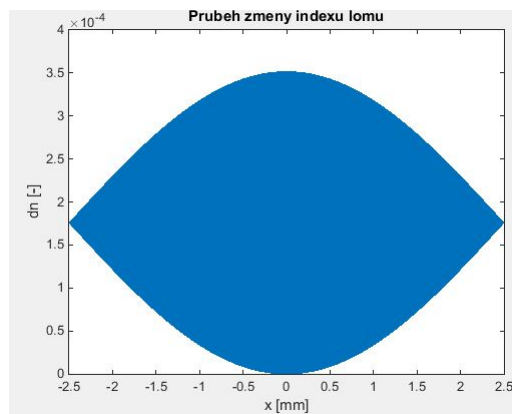


Obr. 9.9: Apodizová mřížka: Přechodí spektrum, odrazivost 50%.

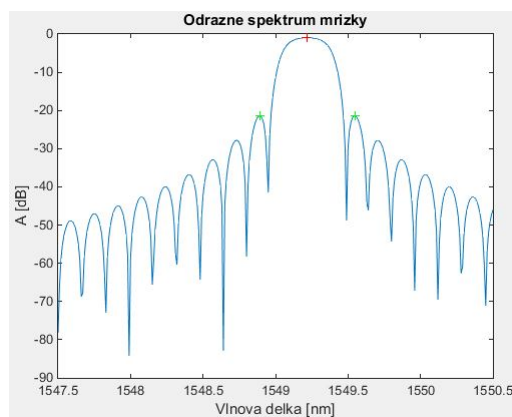
Tab. 9.3: Simulované hodnoty pro neapodizovanou mřížku, odrazivost 50 %.

L [mm]	$\Lambda$ [nm]	dn $\cdot 10^4$	Offset [ $\mu$ m]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]
5	527,5	2,146	1	1	1549,15	50,0154	246,0871	21,6495

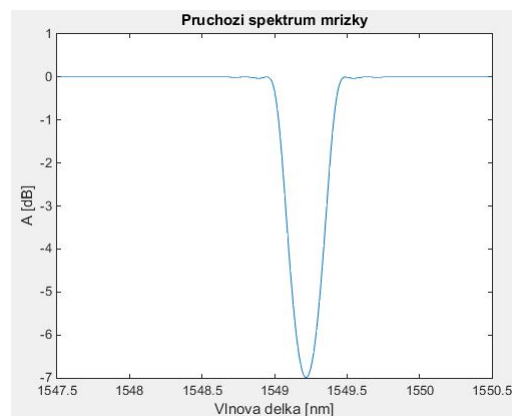




Obr. 9.10: Apodizová mřížka: Závislost indexu lomu na délce mřížky, odrazivost 80 %.



Obr. 9.11: Apodizová mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 80 %.



Obr. 9.12: Apodizová mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 80%.

Tab. 9.4: Simulované hodnoty pro apodizovanou mřížku, odrazivost 80 %.

L [mm]	$\Lambda$ [nm]	dn *10 <sup>4</sup>	Offset [/mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]
5	527,5	3,515	1	1	1549,22	80,0299	317,629	20,4082

## 9.1 Simulace pro statický režim

Dále byly pro statický režim nasimulovány výstupní hodnoty, a to tak že, index lomu byl zkrácen na polovinu. Podle této hodnoty odrazivosti byla poté prakticky vytvořena první mřížka ve statickém režimu.

Tab. 9.5: Simulované hodnoty v tabulkách určené pro statickou metodu apodizace 50 %

L [mm]	$\Lambda$ [nm]	dn $\cdot 10^4$	Offset [/mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]
5	527,5	2,146	1	1	1549,15	50,0154	246,0871	21,6495

L [mm]	$\Lambda$ [nm]	dn $\cdot 10^4$	Offset [/mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]
5	527,5	1,073	0	1	1549,01	35,9462	168,6663	12,1069

Tab. 9.6: Simulované hodnoty v tabulkách určené pro statickou metodu apodizace 80 %

L [mm]	$\Lambda$ [nm]	dn $\cdot 10^4$	Offset [/mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]
5	527,5	3,515	1	1	1549,22	80,0299	317,629	20,4082

L [mm]	$\Lambda$ [nm]	dn $\cdot 10^4$	Offset [/mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]
5	527,5	1,7575	0	1	1549,04	65,9887	204,6693	10,6274

## 10 Praktické vytvoření Braggovy mřížky

Praktické měření bylo provedeno obdobným postupem, jak je popsáno v kapitole 5.2 Měření bylo provedeno ve dvou režimech statickém a dynamickém (oscilačním).

Pro účely vytvoření apodizované Braggovy mřížky bylo použito vlákno typu G.657.A2. Toto vlákno také se osvědčilo při výrobě neapodizované Braggovy mřížky. Jedná se o vlákno s akrylátovou primární ochranou, proto je možné jej jednoduše ostripovat na stripovacím automatu 3SAE-ASII, který zajistí potřebnou čistotu vlákna a tedy bezproblémový zápis. V tomto případě je čistota vlákna velmi důležitá, protože zbytky primární ochrany by se při expozici UV laserem mohly odpařit a poškodit tak fázovou masku, která je umístěna těsně nad optickým vláknem.

### 10.1 Natažení vlákna

Aby byla apodizace správně provedena je třeba vlákno přesně natáhnout, tak aby konce mřížky byly protaženy přesně o jednu periodu. resp. o půl periodu na každé straně, kde je vlákno uchyceno. Natažení bylo provedeno piezoelektrickým aktuátorem PK2FSF1. Ten zajišťuje velmi přesný posuv na malé vzdálenosti. Bylo však nutné vypočítat přesnou vzdálenost posuvu obou piezoelektrických členů. K tomuto účelu bylo použito dynamického režimu, který je součástí ovládacího programu UV laseru. Pro jeho správné nastavení je třeba provést korekci vstupních parametrů a to především rozteče fázové masky a délky mřížky.

$$L_p = \frac{\frac{\Lambda_R}{2} \times 0,001}{L_m} \times \frac{L_c}{2} \quad (10.1)$$

$$U_p = \frac{L_p}{L_{max}} \times U_{max} \quad (10.2)$$

$$n = \frac{U_p}{U_{max}} \times n_{max} \quad (10.3)$$

Kde  $L_p$  [ $\mu m$ ] reálná vzdálenost prodloužení piezokrystalu,  $\Lambda_R$  [ $nm$ ] je rozteč fázové masky, anglicky pitch,  $L_m$  [ $mm$ ] velikost mřížky,  $L_c$  [ $\mu m$ ] celková vzdálenost mezi uchycovacími elementy,  $U_p$  [ $V$ ] skutečné napětí na piezokrystalu,  $L_{max}$  [ $\mu m$ ] maximální možná délka aktuátoru,  $U_{max}$  [ $V$ ] maximální povolené napětí na aktuátoru,  $n_{max}$  maximální počet kroků,  $n$  výsledný počet kroků

$$L_p = \frac{\frac{1055,17}{2} \times 0,001}{5} \times \frac{96,3}{2} \quad (10.4)$$

$$U_p = \frac{5,08}{220} \times 75 \quad (10.5)$$

$$n = \frac{1,73}{75} \times 65536 \quad (10.6)$$

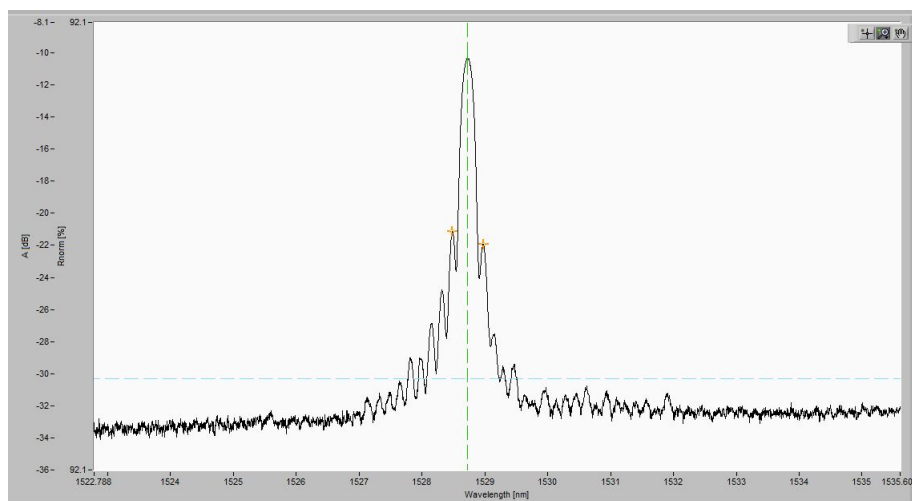
$$n = 1513 \text{ kroků} \quad (10.7)$$

Maximální počet kroků je nastaven již ve výchozím nastavení programu. Jedná se o 16-bitový převodník, z toho důvodu je uvažována hodnota 65536.

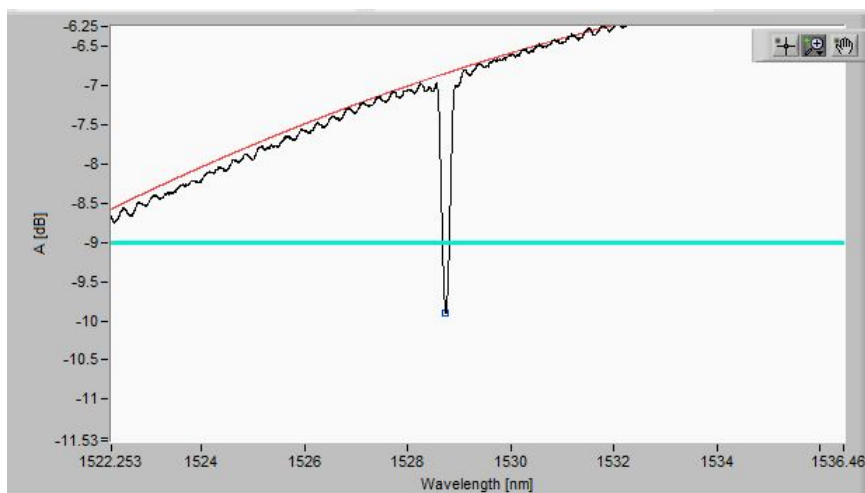
Jedním z nežádoucích vlivů se může být nestejný průměr vlákna. Velmi rozdílný modul pružnosti jádra, které je tvořeno oxidem křemičitým a akrylátovou primární ochranou, však tento problém vyvrací. Tento fakt byl ještě empiricky ověřen serií pokusů. Porovnávaly se možné rozdíly na vlákne, kde byla ostripovaná jen potřebná část pro vytvoření apodizované mřížky s vláknem které bylo ostripováno až k upínacímu mechanismu vlákna. Z výsledného měření však nebyly patrné významné odlišnosti, které by bylo možné označit za chybu způsobenou rozdílným napětím vlákna. Dalším úskalím při napínání vlákna je samotný piezoelektrický aktuátor. Jak je patrné z katalogového listu, vlivem PTZ keramiky dochází k posuvu po hysterezní křivce jak je vidět z obrázku 8.4. Tento problém byl vyřešen opět v ovládacím programu a to sice tak, že posuv postupuje vždy od nuly na stanovenou vzdálenost, protože na vzestupné křivce je nelinearita posuvu výrazně menší.

#### **Možné příčiny špatně vytvořené apodizované mřížky**

- Kohorentnost laserového svazku.
- Souosost laserového svazku s fázovou maskou.
- Souosost exponovaného vlákna s fázovou maskou.
- Správné natažení vlákna.
- Souosost středu natažení vlákna se středem laserového svazku
- Správné předpětí vlákna před expozicí.
- Vzdálenost vlákna od fázové masky.
- Odrazy laserového svazku



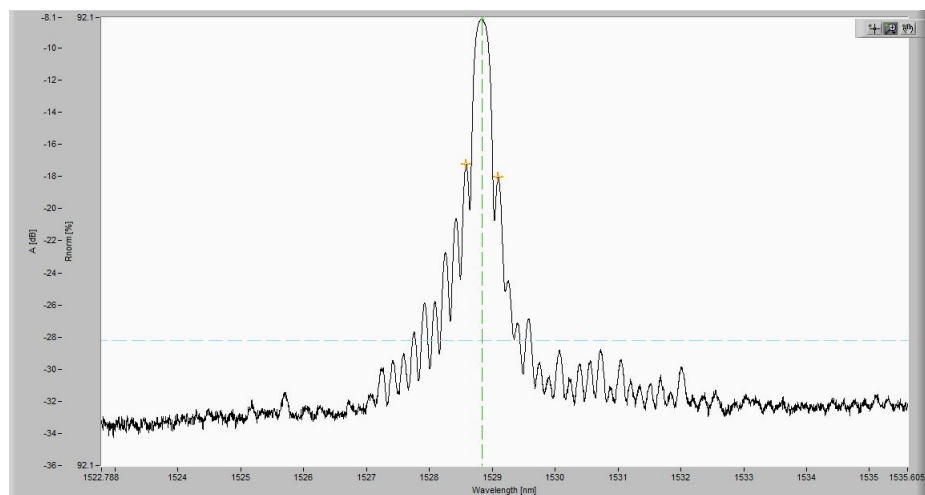
Obr. 10.1: Neapodizová mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 50 %.



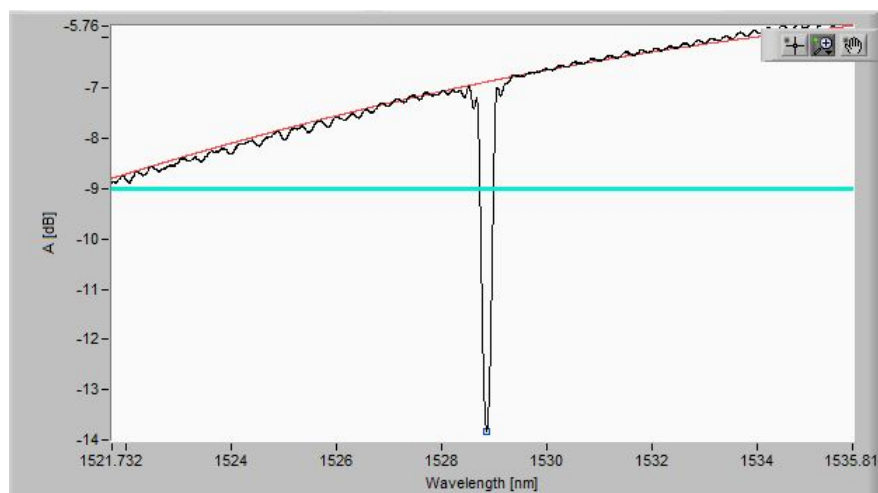
Obr. 10.2: Neapodizová mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 50 %.

Tab. 10.1: Naměřené hodnoty pro neapodizovanou mřížku, odrazivost 50 %.

L [mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]	time [s]
5	0	1528,731	50,47	194,2	10,82	45



Obr. 10.3: Neapodizová mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 80 %.



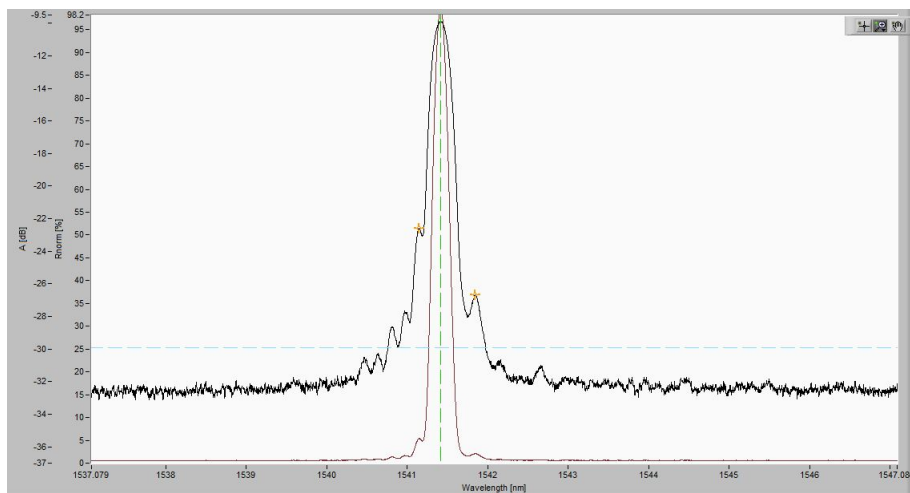
Obr. 10.4: Neapodizová mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 80 %.

Tab. 10.2: Naměřené hodnoty pro neapodizovanou mřížku, odrazivost 80 %.

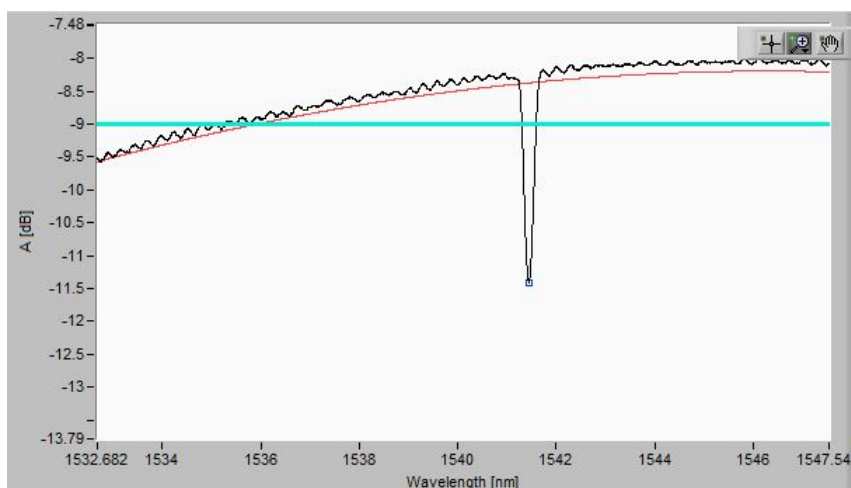
L [mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]	time [s]
5	0	1528,835	79,81	250,6	9,05	127

## 10.2 Statický režim

Aby bylo možné vytvořit apodizovanou Braggovu mřížku ve statickém režimu bylo nutné použít simulace z tabulek 9.5 a 9.6 Samotný proces probíhal tak, že nejprve byla vytvořena první mřížka s odrazivostí přibližně stejnou jako byla určena ze simulace. Následně bylo vlákno nataženo o vypočítanou vzdálenost dle aktuální velikosti mřížky a vlnové délky masky. Po natažení byla provedena expozice druhé mřížky, s již výslednou hodnotou odrazivosti.



Obr. 10.5: Apodizová mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 50 %.

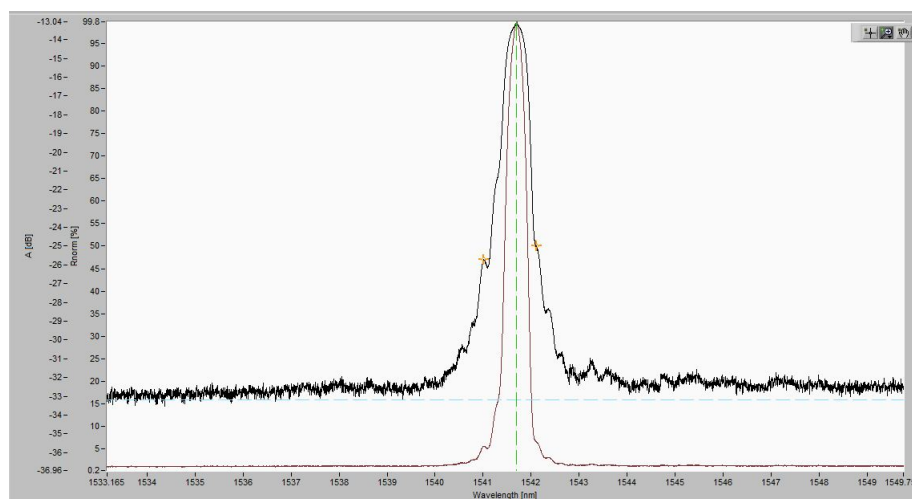


Obr. 10.6: Apodizová mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 50 %.

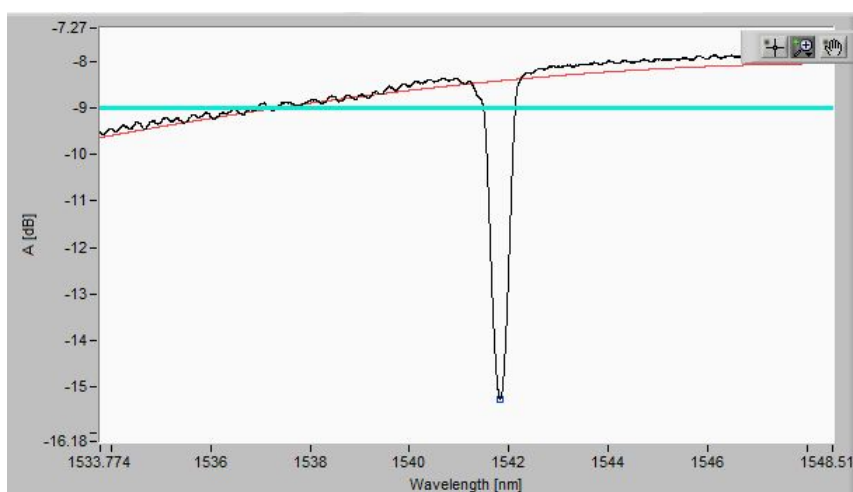


Tab. 10.3: Naměřené hodnoty ve statickém režimu pro apodizovanou mřížku, odrazivost 50 %.

L [mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]	time [s]
5	1	1541,418	50,26	234,5	12,58	76



Obr. 10.7: Apodizová mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 50 %.



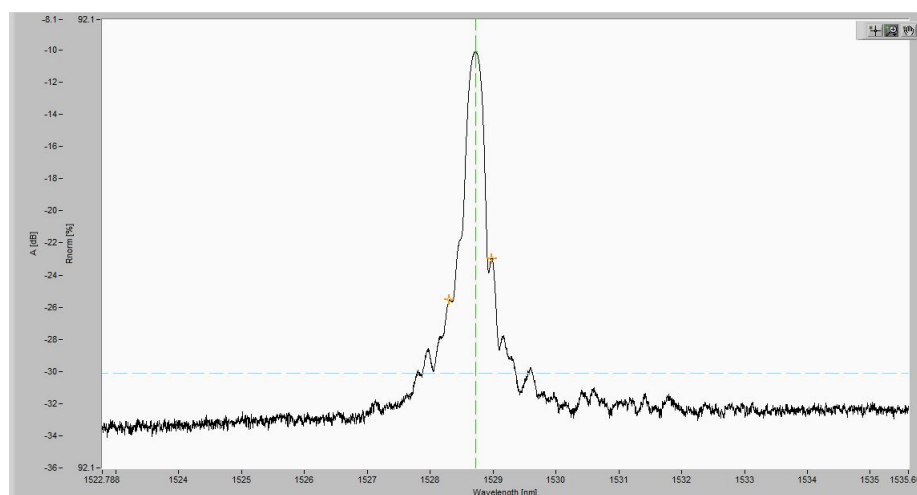
Obr. 10.8: Apodizová mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 50 %.

Tab. 10.4: Naměřené hodnoty ve statickém režimu pro apodizovanou mřížku, odrazivost 80 %.

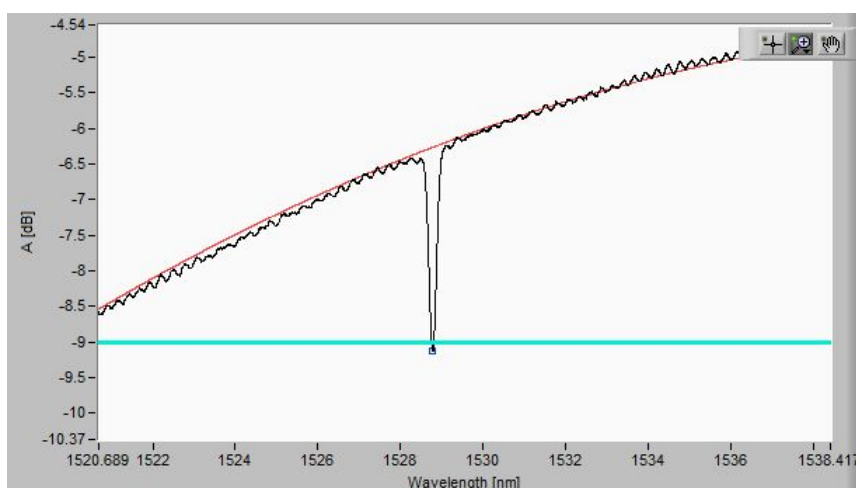
L [mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]	time [s]
5	1	1541,693	79,56	291,1	11,85	177

## 10.3 Dynamický režim

Druhou možností pro výrobu apodizované mřížky byla zvolena metoda dynamického režimu. Tato metoda spočívá v pravidelně se opakující časové změně natažení vlákna. Obě mřížky jsou tedy vytvářeny současně. Impulzy natahování a zkracování vlákna se střídají ve 2 s intervalech. Tato metoda je jednodušší pro obsluhu, protože není nutné znovu přenastavovat hodnoty pro natažení, avšak její úskalí tkví v tom, že při neustálém oscilačním pohybu může dojít k drobnému uvolnění vlákna z uchytů a tedy i k hůře vytvořené apodizované mřížce.



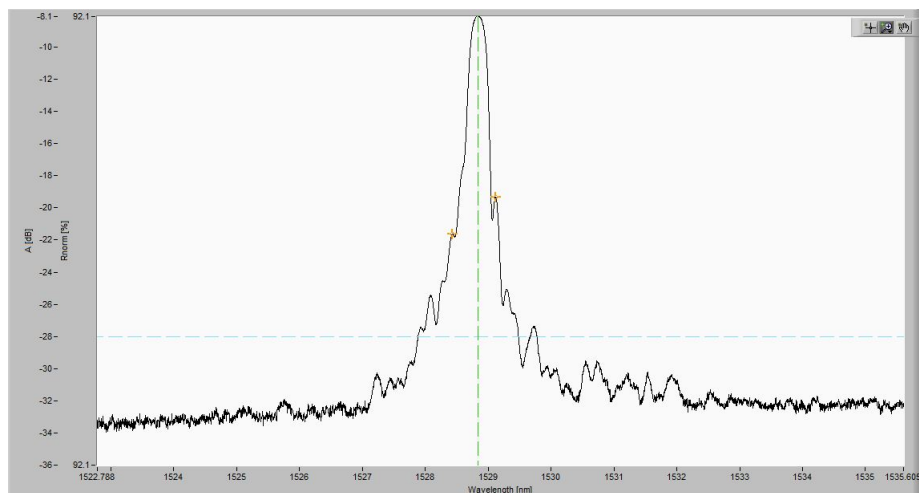
Obr. 10.9: Apodizová mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 50 %.



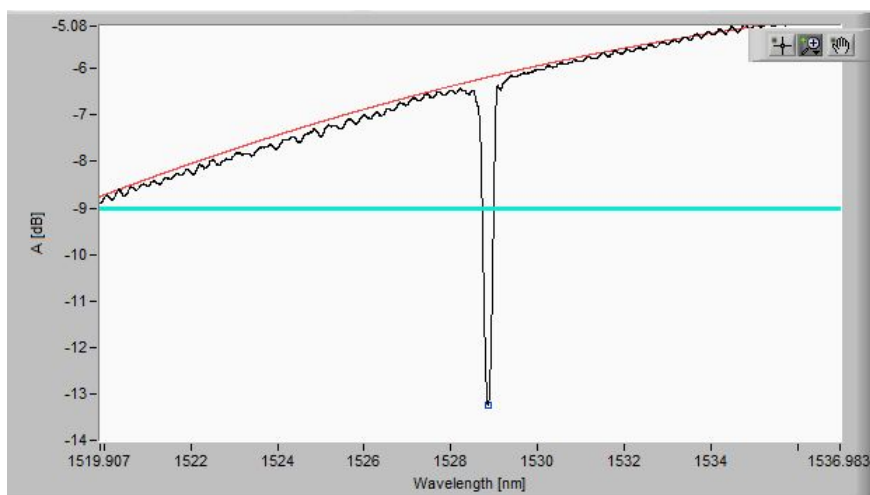
Obr. 10.10: Apodizová mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 50 %.

Tab. 10.5: Naměřené hodnoty v dynamickém režimu pro apodizovanou mřížku, odrazivost 50 %.

L [mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]	time [s]
5	1	1528,721	49,47	220,7	12,87	70



Obr. 10.11: Apodizová mřížka: Odražené spektrum, odrazivost 80 %.



Obr. 10.12: Apodizová mřížka: Průchozí spektrum, odrazivost 80 %.

Tab. 10.6: Naměřené hodnoty v dynamickém režimu pro apodizovanou mřížku, odrazivost 80 %.

L [mm]	Period L [mm]	CWL [nm]	R %	FWHM [pm]	OSNR [dB]	time [s]
5	1	1528,842	80.33	282,5	11,27	178

## 11 Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval využitím optických vláken v praxi a to především jak lze využít jeho detekční schopnosti. K tomu aby, tyto detekční schopnosti bylo možné použít je nutné do jádra vlákna vytvořit mřížku, která změní index lomu. Takto vytvořená mřížka se nazývá Braggova mřížka. Při správně nastavené velikosti mřížky dochází k odrazení určité vlnové délky. Práce nejprve popisuje, jakým způsobem lze Braggovu mřížku vytvořit, další část se zaměřuje především na vytvoření Braggovy mřížky za pomoci fázové masky metodou moaré. Pomocí simulačního programu jsem vytvořil množství simulovaných dat, které znázorňují ideální průběhy neapodizovaných a apodizovaných mřížek. Dále také byly simulovány chybové hodnoty které ukazují, jak bude vypadat Braggova mřížka v případě chybného nastavení parametrů. Experimentálním měřením jsem vytvořil mřížky v optickém vlákne pomocí UV laseru. Apodizované mřížky byly vytvořeny ve statickém a dynamickém režimu, pro odrazivost 50 % a 80 %. Následně byly jednotlivé mřížky porovnány s neapodizovanými mřížkami stejné odrazivosti.

Výsledkem měření je skutečnost že apodizovaná mřížka metodou moaré lze skutečně vytvořit. V reálném prostředí však do její výroby vstupuje velké množství nepříznivých vlivů, které se zatím nepodařilo zcela eliminovat. Z uvedeného vyplývá, že ve skutečnosti dochází k většímu rozdílu mezi ideálními a skutečnými hodnotami.

# Literatura

- [1] KASHYAP, Raman. *Fiber Bragg gratings*. San Diego: Academic Press, 1999, xvi, 458p. ISBN 0-12-400560-8.
- [2] HELÁN, R. *Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur*. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=18905](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18905)>
- [3] URBAN, František. *Měřicí pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně . 2012 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=57318](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57318)>
- [4] *Apodization function* [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <<https://archive.lib.msu.edu/crcmath/math/math/a/a279.htm>>
- [5] MIŠUREC, Jan. *Analýza apodizovaných Braggových vláknových mřížek* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně . 2016 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=130430](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=130430)>
- [6] URBAN, František. *Braggovy mřížky v optických vláknech* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2014 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <<https://core.ac.uk/download/pdf/30299434.pdf>>
- [7] DVOŘÁK, Milan. *Optické senzory* [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <[http://www.kompozity.info/clanky/optik\\_ten/opticke\\_senzory.pdf](http://www.kompozity.info/clanky/optik_ten/opticke_senzory.pdf)>
- [8] MANDÁT, Dušan. *Optické bezkontaktní topografické metody* [online], Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, přírodovědecká fakulta.. 2012 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <<https://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Mandat-Opticke-bezkontaktni-topograficke-metody.pdf>>
- [9] HERSCH, R. D. a S. CHOSSON. *Band Moiré Images* [online]. Switzerland: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <<https://lspwww.epfl.ch/publications/moire/bmi.pdf>>
- [10] MACURA, Pavel a František FOJTÍK. *Experimentální metody v mechanice* [online] Ostrava: Vysoká škola báňská fakulta strojní. Česká republika, 2013 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <[http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_007/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice/02%20Text%20pro%20e-learning/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice%209%20.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_007/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice/02%20Text%20pro%20e-learning/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice%209%20.pdf)>

- [11] *Moire patterns fractals [online]*. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <[http://www.math.nus.edu.sg/aslaksen/gem-projects/maa/0304-2-02-Moire\\_Patterns\\_and\\_Fractals.pdf](http://www.math.nus.edu.sg/aslaksen/gem-projects/maa/0304-2-02-Moire_Patterns_and_Fractals.pdf)>
- [12] OKOUN, Petr. *Optovláknové bodové senzory [online]*. Brno: Vysoké učení technické v Brně.2016 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <<https://core.ac.uk/download/pdf/44400823.pdf>>
- [13] HLA VATÝ, Václav. *Mikrostrukturní optická vlákna s dutým jádrem [online]*. Brno: Vysoké učení technické v Brně.2015 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=103029](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103029)>
- [14] DELOBELLE, B. a V. PLACET. *Analysis of the failure probability of an optical fibre under tensile loading [online]*. .2016 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <<https://core.ac.uk/download/pdf/44400823.pdf>>
- [15] STRNAD, Stanislav. *Optická vlákna a telekomunikace: Výroba optického vlákna [online]*. . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/827>>
- [16] NOŽKA, Marek. *Komunikace pomocí optických vláken [online]*. Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola, Božetěchova 3. . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <<https://mamut.spseol.cz/nozka/psk/044-opticka-vlakna-III/tisk.html>>
- [17] *ProFiber Networking [online]*. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <[https://www.profiber.eu/files/produkty/zvaranie\\_vlakien/Strippovanie\\_optickych\\_vlakien/3SAE\\_AutoStrip\\_II\\_\(ASII\)/3SAE\\_AutoStripII\\_Rev4.pdf](https://www.profiber.eu/files/produkty/zvaranie_vlakien/Strippovanie_optickych_vlakien/3SAE_AutoStrip_II_(ASII)/3SAE_AutoStripII_Rev4.pdf)>
- [18] KOUKOLÍK, Václav. *Využití piezoelektrického jevu v praxi [online]* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <<https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/10094/1/DIPLOMKA.pdf>>
- [19] HRADIL, Aleš. *Návrh mikroaktuátoru s využitím SMART materiálů [online]*. Brno: Vysoké učení technické v Brně.2011 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=40145](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40145)>



- [20] *Thorlabs Amplified Piezoelectric Actuator: datasheet [online]*. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <<https://www.thorlabs.com/drawings/853fc11856bcdcf-D4094503-BD80-A0C7-CBD6C6EDEE308E33/PK2FSF1-SpecSheet.pdf>>
- [21] *FILKA, Miloslav. Optické sítě v telekomunikacích [online]*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2013 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <<https://vut-vsb.cz/courses/get-file-f-s?dir=archiveDir&realName=MOSE%2FSkripta+pro+p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ky%2FMOSE.pdf&attachment=1>>

## **A Přílohy**

- A.1 Simulované hodnoty pro mřížku 3,5 mm**
- A.2 Simulované hodnoty pro mřížku 5 mm**
- A.3 Simulované hodnoty pro mřížku 10 mm**
- A.4 Simulované hodnoty pro mřížku 15 mm**
- A.5 Simulace pro statický režim**
- A.6 Simulace jiného profilu změny indexu lomu**

## **B Příloha**

### **B.1 Eperimentální měření**